

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра оптичних та
оптико-електронних приладів**

«На правах рукопису»

УДК 535.015

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Колобродов В.Г.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації):

151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

на тему: Визначення тривимірної смуги пропускання

оптичної системи мікроскопа

Виконав (-ла): студент 6 курсу, групи ПО-71мн

_____ Гудзь Олексій Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник Боровицький Володимир Миколайович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Старт-ап проект к.е.н., доц. Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент к.т.н. Баженов В.Г.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019 року

Анотація
Визначення Тривимірної Смуги Пропускання
Оптичної Системи Мікроскопа

Магістерська дисертація: пояснювальна записка 82 с., 39 зображень, 25 таблиць та 34 джерела.

Актуальність

Теорія Аббе розглядає процес формування зображення в оптичній системі (ОС) у два етапи: отримання просторового спектру в задній фокальній площині і складання вихідного збільшеного зображення в площині зображення. Експерименти Аббе-Портера - яскраві ілюстрації цієї теорії. Ця теорія може бути розширена від двовимірного (2D) до тривимірного (3D) випадку. Вона повинна враховувати решітку, нахилену щодо оптичної осі навколо осі, паралельної щілині ґратки. Це робить можливими розрахунки мінімального роздільного періоду (MRP) ОС як функції кута нахилу решітки. Після такого узагальнення необхідний перепис існуючих законів та їх розширення для зміни кута повороту предмету.

Представлена також саморобна надійна, компактна та економічна установка для демонстрації досліду Аббе-Портера та дослідів з похилою решіткою, яка виконує роль проекційного мікроскопа та вперше за всю історію будує спектр та зображення об'єкту на одному екрані.

Об'єкт дослідження

Процес формування зображень в оптичній системі мікроскопа.

Предмет дослідження

Розподіл освітленості у задній фокальній площині мікрооб'єктиву мікроскопа.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						1
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Ціль

Метою роботи є експериментальне підтвердження узагальнення теорії Аббе, шляхом розгляду процесу формування зображення періодичних структур (ґраток) з різним нахилом до оптичної осі, яке запропонував проф. Боровицький В. М.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні

Задачі:

- 1) Виконати порівняльний аналіз теорій формування зображень в оптичному мікроскопі (теорія Аббе, теорія Релея, квантова теорія).
- 2) Розробити фізико-математичну модель, яка описує процес формування зображень періодичних структур (ґраток).
- 3) Зібрати оптичний прилад для дослідження процесу формування зображень періодичних структур в оптичному мікроскопі.
- 4) Провести експериментальні дослідження процесу формування зображень періодичних структур в оптичному мікроскопі та порівняти їх результати з теоретично-розрахованими даними.
- 5) Розробити старт-ап проект на основі запропонованої ідеї

Результати:

- Проведений огляд та аналіз літератури: хвильова теорія дифракційної ґратки, хвильова теорія точки, квантова теорія.
- Здійснено опис фізико-математичної моделі
- Внесені модифікації до установки для демонстрації дослідів: вдосконалення каналу первинного зображення для демонстрації одновимірної решітки, одночасне отримання спектру та зображення двовимірної дифракційної решітки, результати при накладанні маски у

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		2

вигляді щілини, подвоєння частоти зображення решітки при закритті непарних максимумів маскою, вплив повороту решітки на кут розходження дифракційних максимумів, модифікація установки для створення блоку повороту решітки

- Проведено експерименти з похилою ґраткою: вплив на первинне зображення, вплив на вторинне зображення
- Розроблено старт-ап проект на основі запропонованої ідеї

Теоретична цінність роботи – узагальнення теорії формування зображення та отримання експериментальних даних.

Конструктивно установка приладу складається з лазера, об'єкта-решітки, закріпленого на поворотному блоці, мікрооб'єктива, світлоподільвача, оптичної системи каналу первинного зображення (за теорією Аббе), дзеркала та оптичної системи вторинного зображення, екрану.

Основні сфери застосування проекційного мікроскопу – освіта, наука і, можливо, реклама.

Публікації

- 1) Mikheenko L., Borovytsky V., Hudz O., Precise prelaunch radiometric calibration of VIIRs. // Proceedings of SPIE – 2015. – Vol. 9607, 960726.
- 2) Hudz O., Borovytsky V., Compact projective microscope. // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science – 2016”.
- 3) Borovytsky V., Hudz O., Antonenko V., The improved optical setup for Abbe-Porter experiment. // Proceedings of SPIE – 2017. Vol. 10375, 1037513.
- 4) Hudz O., Borovytsky V., Improved setup for Abbe-Porter experiment. // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science – 2017”.
- 5) Hudz O., Botovytsky V., Improved optical setup for Abbe-Porter experiment demonstration. // Proceedings of the Conference “A look at the future of instrument making – 2018”

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		3

- 6) Borovytsky V., Hudz O., Abbe experiment with inclined grating // Proceedings of SPIE – 2018. Vol. 10745, 1074512.
- 7) Гудзь А.Е., Боровицкий В.Н Наглядная демонстрация опыта Аббе-Портера // Тезисы конференции «Новые направления развития приборостроения – 2018» Минск, БНТУ.
- 8) Гудзь О.Є., Боровицький В.М., Покращена оптична установка для демонстрації досліду Аббе-Портера // Збірник конференції «Погляд у майбутнє приладобудування – 2019»
- 9) Hudz O.E., Botovytsky V.M., Improved setup for Abbe-Porter experiment // Proceedings of the Conference “Photonics – 2018”.
- 10) Borovytsky V.M., Hudz O., Simulation of light focusing in optics education // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science - 2018”.
- 11) O. Hudz., V. Borovytsky, The coherence in formation of the image in the microscope // Proceedings of the Conference “A look at the future of instrument making – 2019”.

Ключові слова

Мікроскоп, експеримент, дифракційна ґратка, мікрооб’єктив, первинне зображення, вторинне зображення, спектр.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		4

Abstract

Definition Of 3-D Bandwidth In Optical Sytstem Of Microscope

Master's dissertation: explanatory note with 82 pages, 39 images, 25 tables and 34 sources.

Actuality

Abbe's theory considers the process of an image formation in an optical system (OS) in two phases: obtaining the spatial spectrum in the back focal plane and compiling the original magnified image in the plane of the image. Abbe-Porter's experiments are bright illustrations of it. This theory can be expanded from a two-dimensional (2D) to a three-dimensional (3D) case. It should take into account the grating, inclined relative to the optical axis around the axis, parallel to the slit of the grating. This makes possible to calculate the minimum resolvable period (MRP) of the OS as a function of the gradient angle of the grid. After such a generalization, a census of existing laws is required and their extension to the subject angle changing case.

A self-made robust, compact, and economical installation for demonstrating the Abbe-Porter's experiments and inclined grating experiments, which serves as a projection microscope, and for the first time in history builds the spectrum and image of an object on one screen.

Research object

Image formation process in optical microscope.

Research subject

Illumination distribution in back focal plane of the microobjective of the microscope.

					ПО71МН.0000.00 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Purpose

The aim of this work is to confirm experimentally the generalization of the Abbe theory, in developing the process of forming images of periodic structures (gratings) with different inclination to the optical axis, which was proposed by prof. Borovitsky V. M.

Goals to reach

- 1) Perform comparative analysis of the theory of image formation in an optical microscope (Abbe theory, Rayleigh theory, quantum theory).
- 2) Develop a physical and mathematical model that describes the process of forming images of periodic structures (gratings).
- 3) Assemble an optical device for studying the process of forming images of periodic structures in an optical microscope.
- 4) Conduct experimental studies of the process of forming images of periodic structures in an optical microscope and compare their results with theoretical-calculated data.
- 5) Develop a start-up project based on the proposed idea

Results

- 1) Review and analysis of literature: wave theory of diffraction grating, wave theory of a point, quantum theory.
- 2) A description of the physical and mathematical model is carried out
- 3) Modifications were made to the experimental demonstration setup: the improvement of the primary image channel for displaying a one-dimensional grating, the simultaneous reception of the spectrum and the image of a two-dimensional diffraction grating, the results of applying a mask in the form of a slit, doubling the grating image frequency when closing odd maximums with a mask, the effect of turning the grating on an the distance between diffraction peaks, the modification of the setup to create a block of turning of the grating.

					ПО71МН.0000.00 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

- 4) Experiments with sloping gating have been performed: influence on the primary image, influence on the secondary image.
- 5) A start-up project based on the proposed idea.

The theoretical value of the work is the generalization of the theory of image formation and the obtaining of experimental data.

Structurally, the device consists of a laser, an object-grating, fixed on a rotary block, a microobjective, a beam splitter, an optical system of a channel of a primary image (on the theory of Abbe), a mirror and an optical system of a secondary image, a screen.

The main areas of application of a projection microscope - education, science and, possibly, advertising.

Publications

- 1) Mikheenko L., Borovytsky V., Hudz O., Precise prelaunch radiometric calibration of VIIRs.// Proceedings of SPIE – 2015. – Vol. 9607, 960726.
- 2) Hudz O., Borovytsky V., Compact projective microscope. // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science – 2016”.
- 3) Borovytsky V., Hudz O., Antonenko V., The improved optical setup for Abbe-Porter experiment. // Proceedings of SPIE – 2017. Vol. 10375, 1037513.
- 4) Hudz O., Borovytsky V., Improved setup for Abbe-Porter experiment. // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science – 2017”.
- 5) Hudz O., Botovytsky V., Improved optical setup for Abbe-Porter experiment demonstration. // Proceedings of the Conference “A look at the future of instrument making – 2018”
- 6) Borovytsky V., Hudz O., Abbe experiment with inclined grating // Proceedings of SPIE – 2018. Vol. 10745, 1074512.

					ПО71МН.0000.00 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

- 7) Гудзь А.Е., Боровицкий В.Н Наглядная демонстрация опыта Аббе-Портера // Тезисы конференции «Новые направления развития приборостроения – 2018» Минск, БНТУ.
- 8) Гудзь О.Є., Боровицький В.М., Покращена оптична установка для демонстрації досліду Аббе-Портера // Збірник конференції «Погляд у майбутнє приладобудування – 2019»
- 9) Hudz O.E., Botovytsky V.M., Improved setup for Abbe-Porter experiment // Proceedings of the Conference “Photonics – 2018”.
- 10) Borovytsky V.M., Hudz O., Simulation of light focusing in optics education // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science - 2018”.
- 11) O. Hudz., V. Borovytsky, The coherence in formation of the image in the microscope // Proceedings of the Conference “ A look at the future of instrument making – 2019”.

Key words

Microscope, experiment, diffraction grating, microobjective, primary image, secondary image, spectrum.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Актуальність	1
Об'єкт дослідження	1
Предмет дослідження	1
Ціль	2
Задачі:	2
Результати:	2
Публікації.....	3
Ключові слова.....	4
Abstract	5
Actuality	5
Research object	5
Research subject.....	5
Purpose	6
Goals to reach.....	6
Results	6
Publications	7
Key words	8
Перелік умовних позначень і скорочень	12
Вступ.....	13
Розділ 1. Огляд та аналіз літератури	14
1.1. Хвильова теорія дифракційної ґратки	14
1.1.1. Формування зображення одновимірної дифракційної ґратки в результаті дифракції світла на об'єкті при когерентному освітленні	14

1.1.2. Формування зображення двовимірної дифракційної ґратки в результаті дифракції світла на об'єкті при когерентному освітленні	16
1.1.3. Формування зображення об'єкта при різних типах освітлення.....	17
1.1.4. Формування зображення похилого об'єкта при когерентному освітленні	19
1.2. Хвильова теорія точки	20
1.2.1. Формування зображення дифракційної ґратки в результаті дифракції світла на апертурі мікрооб'єктива.....	20
1.2.2. Освітлення частково когерентним світлом	22
1.2.3. Функції взаємної інтенсивності при частковій когерентності джерела	24
1.2.4. Абсолютна когерентність та некогерентність.....	26
1.2.5. Структура зображення в системах низької і високої кутової апертури.....	27
1.2.6. Векторна функція зіниці та векторна передатна функція.....	28
1.3. Квантова теорія.....	30
1.3.1. Квантова теорія світла для просторової роздільної здатності.....	30
1.3.2. Квантового еквівалент тривимірної просторової смуги пропускання	31
Розділ 2. Фізико-математична модель	34
Розділ 3. Установка для експерименту	41
3.1. Установка для демонстрації первинного і вторинного зображення досліду Аббе-Портера на одному екрані	41
3.2. Вдосконалення каналу первинного зображення для демонстрації одновимірної решітки	42

3.3. Одночасне отримання спектру та зображення двовимірної дифракційної решітки	43
3.4. Результати при накладанні маски у вигляді щілини	45
3.5. Подвоєння частоти зображення решітки при закритті непарних максимумів маскою.....	49
3.6. Вплив повороту решітки на кут розходження дифракційних максимумів.....	51
3.7. Модифікація установки для створення блоку повороту решітки...	51
Розділ 4. Експеримент з похилою ґраткою	53
4.1. Вплив повороту об'єкта на первинне зображення	53
4.1. Вплив повороту об'єкта на вторинне зображення	56
Розділ 5. Розробка стартап проекту	63
5.1 Опис ідеї проекту	63
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	65
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту.....	66
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	72
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап проекту.....	75
5.6 Висновки розділу стартап проекту	77
Висновок	79
Список використаних джерел.....	80

Перелік умовних позначень і скорочень

ОС – оптична система

MRP – minimal resolvable period

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		12

Вступ

Відомо, що професор університету в місті Йена та науковий консультант компанії Zeiss Ернст Аббе запропонував дифракційну теорію формування зображення в оптичному мікроскопі. Для її підтвердження він продемонстрував експеримент з формуванням первинного та вторинного зображень ґраток, який став класичним оптичним експериментом. Одночасно Герман Гельмгольц, професор фізіології, написав коротку статтю про межу просторового дозволу в оптичному мікроскопі, написану незалежно від роботи Аббе, яка спершу стала набагато більш відомою у науковій спільноті. Пізніше Август Портер, власник магазину оптичних інструментів з Чикаго, показав аналог експерименту Аббе для двохвимірних періодичних об'єктів. Цей дослід отримав назву експерименту Аббе-Портера. Після того за минулі роки хвильова теорія дифракції на об'єкті Аббе була значно розширена та доповнена. Так Леонід Мандельштам вивчав таку систему при різних типах освітлення для різних типів освітлення об'єкту.

Професор природничої філософії Лондона в лорд Релей описав процес формування зображень з точки зору дифракції світла на апертурі мікрооб'єктива. Гопкінс та Марешаль вивчали когерентність освітлення таких систем. Вольф та Шепард розширили знання формування зображення в таких системах, глибоко занурившись у фізику та математику процесу. Нарешті, доктор Ернст Стельцер дослідив просторову роздільну здатність мікроскопа з точки зору квантової невизначеності.

Однак, сучасна теорія формування зображення в оптичному мікроскопі базується на одному значному недоліку – не врахована залежність процесу формування зображення відповідно до повороту об'єкта – дифракційної ґратки. За таких умов існуюча теорія формування зображення стає лише частинним випадком, коли об'єкт розташовано перпендикулярно оптичній осі, хоч і, безумовно, найважливішим випадком цієї теорії.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		13

Розділ 1. Огляд та аналіз літератури

1.1. Хвильова теорія дифракційної ґратки

1.1.1. Формування зображення одновимірної дифракційної ґратки в результаті дифракції світла на об'єкті при когерентному освітленні

1873 року професор фізики в університеті Єни в Німеччині Ернст Аббе опублікував у біологічному журналі велику статтю «Внесок до теорії мікроскопа і мікроскопічного сприйняття», де була вперше розглянута теорія формування зображення в оптичному мікроскопі, і, що важливо, підтвердив цю теорію реальними експериментами.[1]

У своєму досліді Аббе встановив періодичний об'єкт – одновимірну дифракційну ґратку – у площині предмету мікрооб'єктива зі збільшенням $5\times$ і апертурою 0.11 та освітлював її когерентним паралельним осьовим пучком світла (конденсор зі щільовою діафрагмою). Частина пучків, що проходить крізь об'єкт і потрапляє в оптичну систему, формує у задньому фокусі мікрооб'єктива набір яскравих дифракційних плям – дифракційну картину (спектр), що Аббе назвав «первинним зображенням» об'єкту. Далі в результаті інтерференції у площині зображення системи утворюється збільшене зображення об'єкта, що Аббе назвав «вторинним зображенням», спостерігаючи в окуляр з тубусною лінзою фокусом 164.5 мм. Коли необхідно було побачити первинне зображення, вчений прибирав окуляр і дивився на спектр в задньому фокусі мікрооб'єктива. Встановивши в площині первинного зображення маску, яка перекриває лише непарні максимуми, можливо спостерігати подвоєння частоти штрихів у площині вторинного зображення (рис. 1.1).

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		14

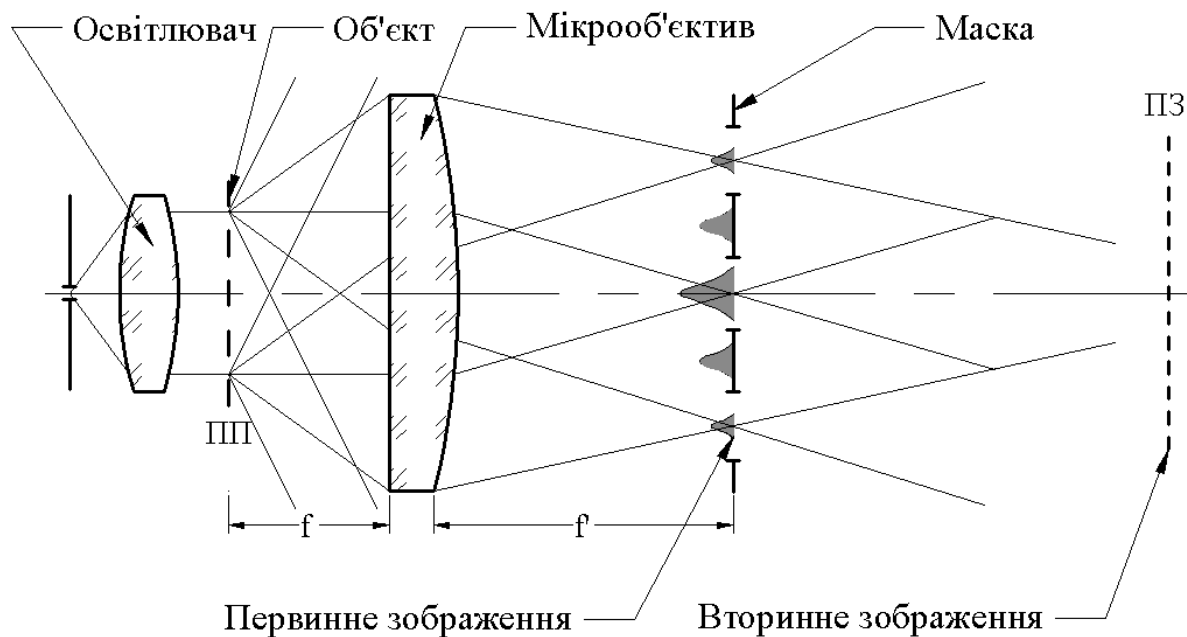


Рис. 1.1 – Дослід Аббе

Основні положення та особливості теорії Аббе:

- Теорія справедлива лише для випадку осевого когерентного освітлення об'єкту, розташованого перпендикулярно до оптичної осі.




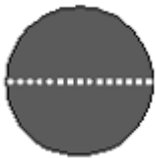



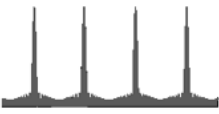




- Дифракційна картина у площині первинного зображення складається теоретично з нескінченної кількості однакових по висоті максимумів на однаковій відстані один від одного, причому один із них, що відповідає нульовому куту дифракції і знаходиться в тому місці де зображення джерела освітлення утворилось би без дифракції, приймають за «нульовий максимум»; всі інші максимуми розташовані симетрично відносно нього.

- Формування зображення об'єкту відбувається в два етапи: утворення його просторового спектру в задній фокальній площині об'єктива, а потім – збільшеного зображення об'єкта в площині зображення.

- В результаті дифракції на об'єкті деякі відхилені промені проходять через об'єктив, інша частина відсікаються апертурою.[1]

Таким чином, гармоніки з надто високими просторовими частотами не проходять через числову апертуру, в результаті чого зображення малих об'єктів не може бути отримано, з чого і випливає відома формула про межу просторового розділення, яка визначається лише числовою апертурою і робочою довжиною хвилі об'єкта, а отже збільшити розділення можливо лише збільшивши числову апертуру або зменшивши довжину хвилі. Мінімальною умовою для утворення зображення є присутність у площині первинного зображення хоча б двох максимумів (таблиця.1.1).

Таблиця 1.1. Залежність зображення від кількості діючих максимумів

Первинне зображення				
Розподіл освітленості				
Вторинне зображення				

Того ж року Герман Гельмгольц, професор фізіології в університеті Гейдельбергу в Німеччині написав коротку статтю про межу просторового дозволу в оптичному мікроскопі, написану незалежно від роботи Аббе, яка спершу стала набагато більш відомою у науковій спільноті. Крім аналогічної загальновідомої формули границі розділення стаття містила приклад її розрахунку для довжини хвилі 0,55 мкм, найбільш чутливої для ока, а також деякі емпіричні дані.[2]

1.1.2. Формування зображення двовимірної дифракційної ґратки в результаті дифракції світла на об'єкті при когерентному освітленні

У 1906 році Альберт Портер, власник магазину Чикаго «Фізичний та астрономічний інструмент» в США, під враженням від праці Аббе розширив відомі уявлення, описавши схожий до Аббе експеримент просторової

фільтрації, але для двовимірних періодичних структур, та навіть обґрунтування за допомогою ряду Фур'є у своїй публікації «Про теорію дифракції мікроскопічного зору». [3]

В якості об'єкта виступала решітка з перпендикулярно схрещеними штрихами. При освітленні паралельним пучком світла у площині первинного зображення виникала двовимірна сукупність дифракційних максимумів – яскравих плям. Хвильовий фронт проходить крізь об'єкт і в результаті дифракції відхиляється вертикально і горизонтально відносно первісного напрямку, що і породжує спектр із двовимірної системи плям. Якщо аналогічно до досліду Аббе накласти маску, перекриваючу непарні максимуми, можна отримати збільшення частоти вертикальних і горизонтальних штрихів (рис. 1.2).[3]

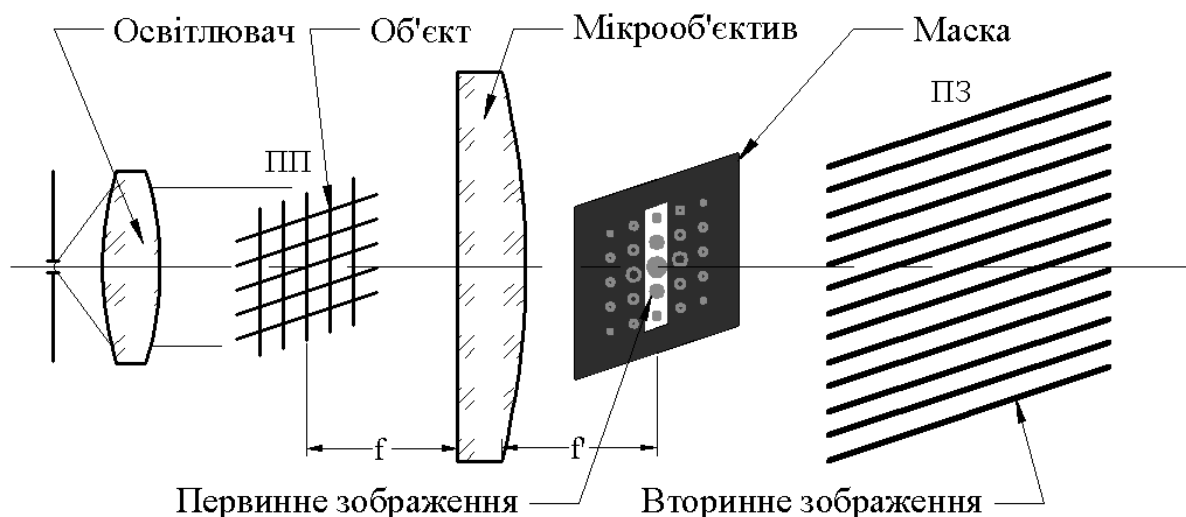


Рис. 1.2 – Дослід Портера

1.1.3. Формування зображення об'єкта при різних типах освітлення

В 1911 році Леонід Мандельштам з фізичного факультету Університету Страсбурга в Німеччині провів більш розширений експеримент з двовимірною сіткою для різних типів освітлення об'єкту:

- Когерентне освітлення (конденсор з малою апертурою, що генерує паралельний пучок).

- Розсіяне (некогерентне) освітлення.
 - Самосвітний об'єкт (сітка складом з розжарених тонких проволоч).
- [4,21]

До цього вважалось, що самосвітний предмет не формує первинного зображення, тож в результаті і його вторинне зображення не змінюється при встановленні маски у задню фокальну площину мікрооб'єктиву. Вчений дослідив, що зображення самосвітного об'єкта, як і некогерентно освітленого по суті мають ті ж властивості, що й зображення когерентно освітленого (рис. 1.3).

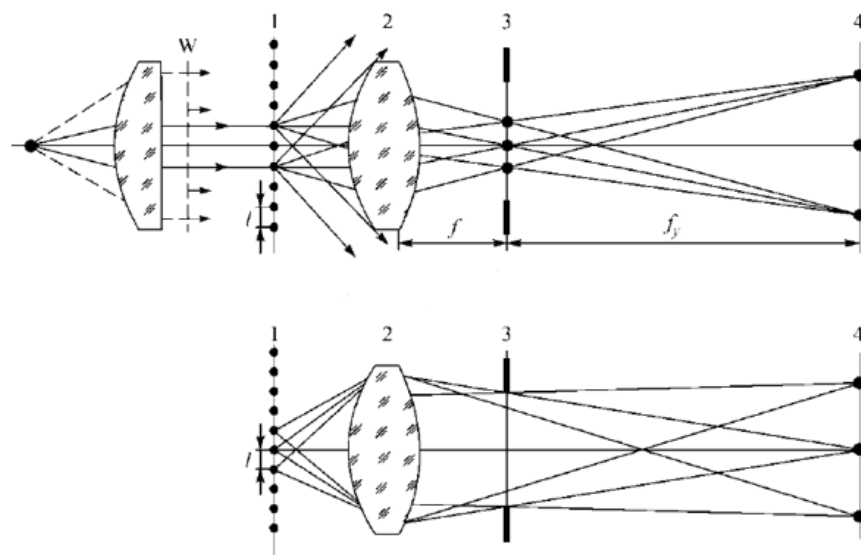


Рис. 1.3 – Експерименти Мандельштама

Він представив таке некогерентне джерело як сукупність когерентних точок, тож при самосвітному об'єкті явище дифракції на періодичній структурі маски зберігається, і навіть за відсутності видимого спектру в площині первинного зображення, встановлення маски призводить до зміни вторинного зображення. Кожна невелика ділянка на поверхні об'єкта випромінює як елементарне когерентне джерело, це випромінювання проходить через мікрооб'єктив і дифрагує на апертурі з прорізами (масці) в задній фокальній площині. В результаті відбувається просторова фільтрація

численних дрібних ділянок. Якщо ці дрібні ділянки не є когерентними, то в задній фокальній площині не з'являється первинного зображення.[4]

Таким чином, теорія Аббе не є унікальною для пояснення формування зображення в мікроскопі. Загальний підхід полягає у описі збільшеного зображення як набору численних елементарних «дифрагованих зображень точок». Щоб отримати цей образ, вчений підсумував такі елементарні зображення.

1.1.4. Формування зображення похилого об'єкта при когерентному освітленні

Значного розвитку теорія Аббе зазнала лише у 2017 році з монографією професора Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» Володимира Боровицького, який дослідив формування зображення одновимірної ґратки у тривимірному просторі залежно від кута її повороту відносно оптичної осі, а також при різних варіантах нахилу освітлення (рис. 1.4).[5]

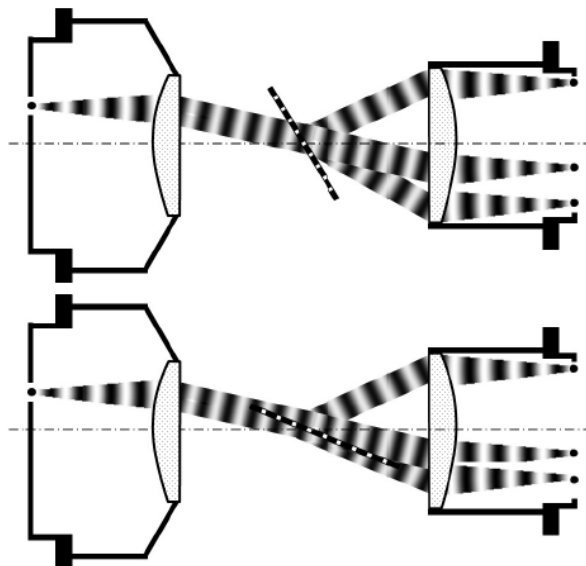


Рис. 1.4 – Досліди проф. Боровицького для похилої ґратки

Цей експеримент довів, що теорія Аббе може бути розширена з 2D випадку (коли решітка розміщена в площині об'єкта) до 3D-випадку (коли

ґратки можуть мати різні нахили в просторі 3D-об'єктів. Під час його дослідів були виміряні координати максимумів просторового спектру похилої решітки, які повністю відповідали теоретично передбаченими. Було показано, що у випадку похилої ґратки границя розділення мікроскопу залежить від довжини хвилі, числової апертури та кута нахилу в будь-якому напрямку в просторі 3D-об'єктів в повній відповідності з запропонованою теорією. Деякі просторові гармоніки з високими просторовими частотами, при нахилі в будь-якому напрямку, не можуть проходити через ОС, тож будь-яка ОС має обмежену просторову роздільну здатність у 3D-просторі.[5]

Цей експеримент можна розглядати як один з дуже цікавих експериментів для демонстрації, розуміння та пояснення фізичного процесу формування 3D-зображень ОС. Відомий експеримент Аббе став лише частковим випадком, коли кут нахилу ґратки рівний нулю, і, звичайно, найважливішим випадком цього експерименту з похилою решіткою.

1.2. Хвильова теорія точки

1.2.1. Формування зображення дифракційної ґратки в результаті дифракції світла на апертурі мікрооб'єктива

У 1896 році професор природничої філософії Королівського інституту Лондона в Великобританії лорд Релей описав процес формування зображень з урахуванням дифракції світла на апертурі мікрооб'єктива. Він вивчав пари самосвітних і несамосвітних точкових об'єктів.[7]

Відомо, що зображення самосвітної точки може бути представлене дифракційним кружком Ейрі, який виникає за рахунок інтерференції всіх елементарних хвиль, згідно до принципу Гюгенса-Френеля, з хвильової поверхні, розташованої в отворі мікрооб'єктива. Елементарні хвилі від різних точок самосвітного об'єкта між собою некогерентні, тож між собою інтерферувати не можуть, тобто для дослідження зображення такого самосвітного об'єкта необхідно підсумувати освітленості окремих дифракційних елементів, пропорційних квадратам амплітуд. Отже, якщо

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		20

точки не є когерентними (а є самосвітними), відбувається суперпозиція інтенсивностей, вказана на рисунку 1.5 ліворуч.[6,7,15]

У випадку об'єктів, освітлених когерентним джерелом, елементарні хвилі, які виходять з кожної точки, між собою когерентні, тож у такому випадку при складанні дифракційних зображень окремих точок об'єкта необхідно враховувати інтерференцію хвиль, тобто для дослідження зображення такого несамосвітнього об'єкта необхідно підсумувати амплітуди дифракційних фігур, після чого визначити освітленість зведенням результуючої амплітуди в квадрат (рис. 1.5, праворуч). [6,7,15]

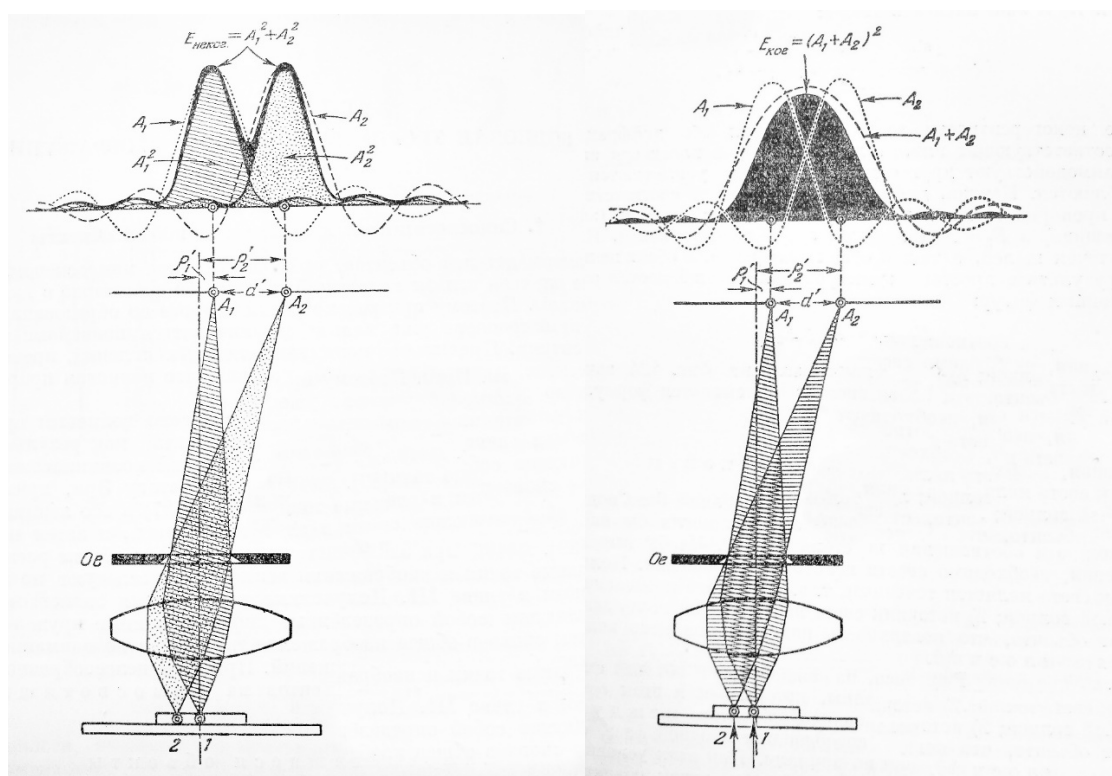


Рис. 1.5 – Зображення: двох самосвітних точок (ліворуч), двох несамосвітних когерентних точок (праворуч)

Отже, якщо точки в двох точковому об'єкті є когерентними (не самосвітними), то зображення формується як суперпозиція амплітуд хвиль.

Це означає, що просторова роздільна здатність мікроскопа залежить від освітлення об'єкта. Релей також вивчав предмети у вигляді ліній і решіток. [6,7,15]

Основні положення та особливості теорії Релея:

– Зображення точкового джерела є результатом дифракції пучка апертурі мікрооб'єктива. Зображення точкового об'єкта задається як функція розсіяння точки (ФРТ). З таких елементарних точкових зображень складаються зображення більш складних об'єктів

– Дифракція світла в площині об'єкта не була врахована, як і формування первинного зображення Аббе, тобто теорія Релея застосовна лише для опису зображень некогерентних самосвітних та когерентних несамосвітних об'єктів.

– Лорд Релей також запропонував критерій просторового дозволу, згідно до якого мінімальна роздільна відстань дорівнює відстані між центром і першим мінімумом ФРТ мікрооб'єктива (відстань від центру до першого темного кільця кружка Ейрі), який може бути застосований лише мікрооб'єктивів з малою апертурою, ФРТ яких може бути описана як кружок Ейрі.[6,7,15]

Нині відомо, що підходи Аббе та Релея рівноцінні. Теорія Аббе розглядає дифракцію світла на об'єкті з обмеженням пучка апертурою. Теорія Релея розглядає дифракцію на апертурі з обмеженням поля зору в площині предмета.

Таким чином, розрахунок розподілу інтенсивності в площині зображення завжди вимагає двох етапів інтегрування: по площині зображення і по апертурі мікрооб'єктива, незалежно від порядку інтегрування.

1.2.2. Освітлення частково когерентним світлом

У 1940 році професор фізичного інституту Ленінградського університету СРСР Дмитро Рождественський написав статтю про частково когерентне освітлення в мікроскопі. [8,24]

Об'єкт, рівномірно освітлений з усіх боків, за певних умов випромінює світло, як самосвітний. Отже, зображення самосвітного об'єкта має ті ж властивості, що й зображення когерентно освітленого, що і призводить до

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

подвоєння штрихів в зображенні, які отримав Мандельштам. Рождественський показав, що в реальних оптичних системах є частково-когерентне освітлення і важко наблизитися як до самосвітності, так і повністю когерентного освітлення, і провів цікаві досліді (рис. 1.6).

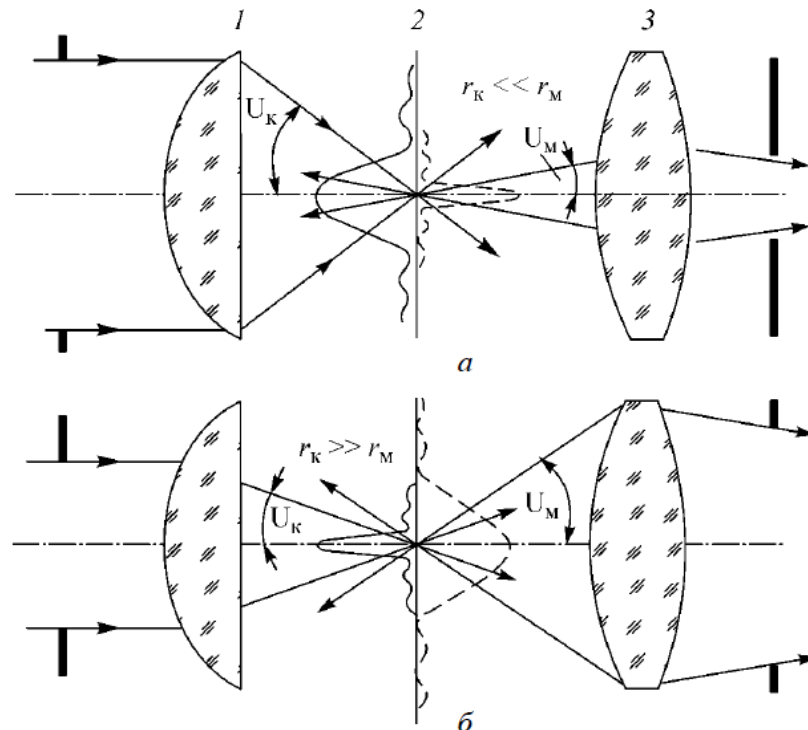


Рис. 1.6 – Досліді часткової когерентності Рождественського

Конденсор 1 проектує джерело світла, розташоване в нескінченності, на даний об'єкт в площину 2. Кожна точка джерела зображується незалежно, так як випромінювання від усіх точок джерела некогерентне. Властивості зображення точкового джерела характеризуються параметрами конденсора. Істотну роль грає його апертура. Її величина визначає дифракційну картину Ейрі в площині предмета.

Він ввів співвідношення між числовою апертурою конденсатора і числовою апертурою мікрооб'єктива як ступінь некогерентності NA_c / NA :

- При $NA_c / NA = 0$ точкове зображення конденсатора в площині об'єкта дуже велике і охоплює все поле зору, а отже весь об'єкт освітлюється. Це випадок чистого когерентного освітлення.

– Коли $NA_c / NA \rightarrow \infty$ освітлення замало, тож об'єкт освітлюється великим набором малих некогерентних ділянок. Це випадок чистого некогерентного освітлення (абсолютна некогерентність неможлива, оскільки $NA > 0$).

– Коефіцієнт $NA_c / NA \ll 1$ означає більший вплив когерентного освітлення і $NA_c / NA \gg 1$ означає більшу роль некогерентного освітлення.

– Оптимальним є співвідношення $NA_c \approx NA$, коли когерентні ділянки конденсатора та об'єкти майже рівні. [8]

Цю теорію можна розглядати як розширення теорії Релея до загального випадку частково когерентного освітлення.

1.2.3. Функції взаємної інтенсивності при частковій когерентності джерела

1977 року фізик Редингського університету у Великобританії Гарольд Гопкінс у своїй роботі розглянув моделювання формування зображення при частково-когерентному освітленні та ввів поняття "ефективного" джерела, яке являє собою сукупність точок, кожна з яких створює повністю когерентне освітлення предмета. При цьому когерентні хвилі від кожної точки джерела вважаються взаємно некогерентними, а підсумкова інтенсивність частково-когерентного зображення знаходиться як суперпозиція по інтенсивності окремих когерентних зображень.[9,10]

У підході Гопкінса для моделювання формування зображення використовується загальний коефіцієнт пропускання, який не залежить від властивостей предмета і повністю описує вплив оптичної системи і освітлення на формування зображення. Загальний коефіцієнт пропускання обчислюється за допомогою трудомісткого інтегрування, але один раз, і потім багато разів використовується для моделювання зображень різних шаблонів.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Моделювання таких систем відбувається у канонічних координатах (рис. 1.7), запропонованих вченим 1965 року. Вони і нині активно використовуються при проектуванні оптичних систем. На малюнку 6 представлена схема моделювання формування зображення в канонічних координатах, де ξ_x, ξ_y - канонічні координати на площині джерела, η_x, η_y - предметні канонічні координати, ρ_x, ρ_y - канонічні координати зіниці, η'_x, η'_y - канонічні координати на площині зображення.

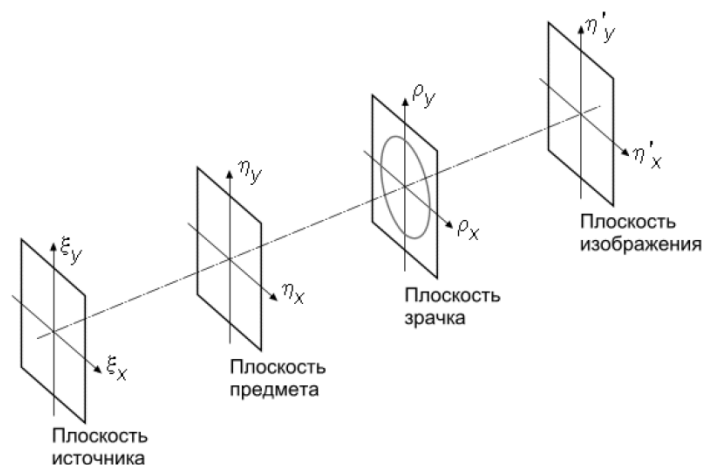


Рис. 1.7 – Канонічні координати Гопкінса

У канонічних координатах математична модель формування зображення має такі властивості :

- Дифракція в оптичній системі математично описується перетворенням Фур'є без масштабних множників.
- Площина "ефективного" джерела і площина зіниці мають однаковий масштаб, тобто $\rho_x = \xi_x, \rho_y = \xi_y$.
- Збільшення оптичної системи дорівнює одиниці, тобто $\eta_x = \eta'_x, \eta_y = \eta'_y$.
- Область зіниці оптичної системи має форму кола одиничного радіуса.

Подання джерела за допомогою функції взаємної інтенсивності, яка описує когерентні властивості світла, що падає на предмет - один з найбільш загальних підходів до обчислення розподілу інтенсивності зображення при частково-когерентному освітленні.[9,10]

1.2.4. Абсолютна когерентність та некогерентність

1960 року французький фізик Андре Марешаль опублікував свою роботу в Парижі, в якій розглядав дифракційну структуру зображення. Окрема глава присвячена частковій когерентності, освітленню та утворенню зображення в мікроскопі (рис. 1.8).[11]

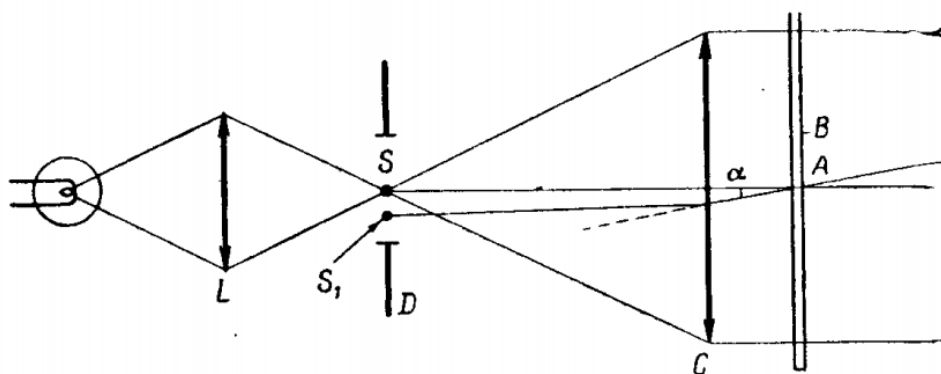


Рис. 1.8 – Модель Марешаля

Умови когерентності двох точок, відстань між якими $AB = y$, якщо α – максимальний кут збіжності променів, освітлюючих об'єкт:

- Якщо зміна оптичного шляху хвиль, що прийшли від джерела, достатньо мала, а саме $y \sin \alpha \ll \lambda$ – маємо наближення до абсолютної когерентності. Також справедливе твердження: якщо дві точки об'єкта достатньо близько одна до одної також існує когерентність
- Коли на об'єкт падають хвилі зі значними кутами між ними, до двох віддалених точок об'єкта прийдуть коливання зовсім різних орієнтацій, тобто при $y \sin \alpha \gg \lambda$ – маємо наближення до абсолютної некогерентності.

Також Марешаль, вивчаючи часткову когерентність джерел випромінювання, ввів поняття степені (або фактору) когерентності, який характеризується миттєвими комплексними амплітудами двох точок, які створюють інтерференцію в єдиний момент часу. Згідно до його тверджень, степінь часткової когерентності між двома точками площини, освітлюваної одним джерелом, як і степінь когерентності між двома різними напрямленнями, може бути виражена за допомогою перетворення Фур'є від розподілу енергії, випромінюваної джерелом.. Марешаль довів, яким би не був конденсор, будь це протяжне чи точкове джерело, які б він не мав аберації, на степінь часткової когерентності об'єкта впливає лише величина його отвору . [11]

1.2.5. Структура зображення в системах низької і високої кутової апертури

В 1959 році видатний вчений Еміль Вольф з Кафедри теоретичної фізики Університету Манчестера у Великобританії став автором об'ємної праці під назвою «Електромагнітна дифракція в оптичних системах».[13]

В даній роботі було отримано інтегральне уявлення про електромагнітне поле в просторі зображення оптичної системи, що дозволяє визначити повну структуру зображення в системах як низької, так і високої кутової апертури. З використанням зазначеного наближення, поле зображення може бути спрогнозоване з високим ступенем точності в усіх точках, які не надто близькі до вихідної зіниці на основі припущення, що відстань від вихідної зіниці і її лінійні розміри великі порівняно з довжиною хвилі. Таке уявлення розглядатися як узагальнення добре відомого подання Люнеберга (1944), введеного для скалярного випадку Дебаєм (1909) і розширеним Пічем (1925), і є порівняно простішим. Представлення має просту фізичну інтерпретацію в термінах дещо видозміненого принципу Гюйгенса-Френеля, який діє з векторними плоскими вторинними хвилями, а не сферичними (рис.1.9).

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		27

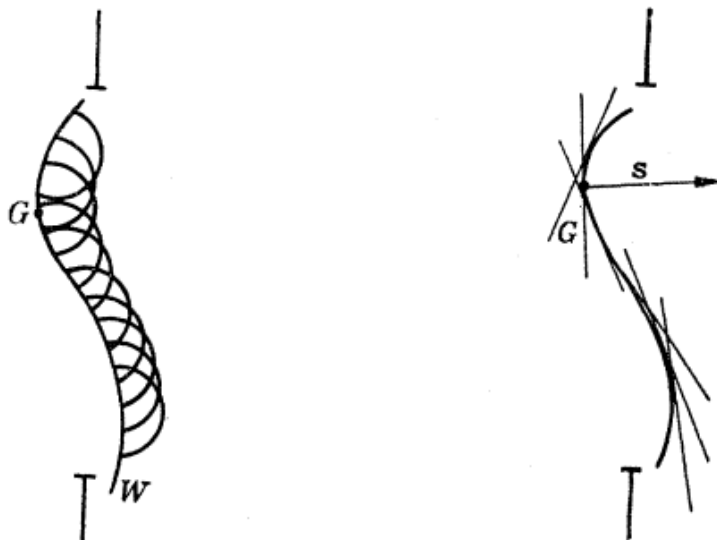


Рис.1.9 – Фізичне представлення хвильового фронту у вихідній зіниці

У частині II цього дослідження, використовуються результати для визначення структури зображень у фокальній області апланатичних систем, а особлива увага приділяється системам високої кутової апертури.[14]

1.2.6. Векторна функція зіниці та векторна передатна функція

1992 року Колін Шепард, професор кафедри Фізичної оптики в Університеті Сіднея, що в Австралії, запропонував концепт векторної функції зіниці та векторної передатної функції та показав, що таке уявлення може кардинально відрізнитись від скалярного.[12]

Тривимірна векторна передатна функція стала корисною концепцією для опису формування зображення в конфокальній скануючій мікроскопії [1]. З неї можна отримати відповідну двовимірну передавальну функцію для фокусування. У конфокальній передачі це можна вивести аналітично. Одновимірна передавальна функція для візуалізації зображення, яка може бути виражена в аналітичній формі навіть для флуоресценції з різними довжинами хвиль збудження і флуоресценції, може бути отримана тривимірної передавальної функції. Також була представлена двовимірна передавальна функція для фокусування в конфокальній флуоресцентній мікроскопії з детекторами кінцевого розміру (рис. 1.10).

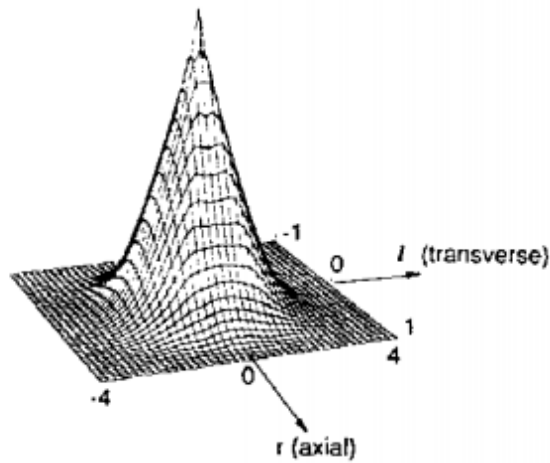


Рис.1.10 – Двовимірний ОПФ

Дві важливі властивості тривимірної передавальної функції за Шепардом:

- Для тонких об'єктів двовимірний ОПФ в фокусі є проекціями тривимірних передавальних функцій на фокальну площину.
- Для лінійних об'єктів одновимірними ОПФ на осі є проекціями тривимірних передатних функцій на вісь

Для конфокальної флуоресцентної побудови зображення тривимірний ОПФ задається самозгорткою тривимірної функції передачі контрасту для конфокальної системи передачі. Останній ідентифікується з 3-D OTF для звичайної флуоресцентної системи. За допомогою детектора кінцевого розміру 2-D-фокус OTF може демонструвати зміни знаків. Для детектора дуже великої площі властивості візуалізації конфокальної флуоресцентної системи стають ідентичними властивостям для звичайної флуоресцентної системи.

Шепард запропонував обчислювати тривимірну векторну ОПФ безпосередньо з векторної функції зіниці, не припускаючи параксіального наближення і радіальної симетричності.[12] Його модель використовує єдиний автокореляційний інтеграл з декартовими координатами зіниці для обчислення передатної функції апланатичних систем (рис.1.11).[12]

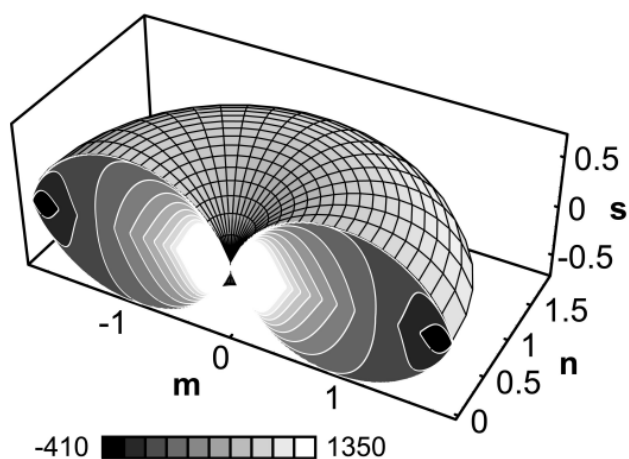


Рис. 1.11 – Тривимірний ОПФ

1.3. Квантова теорія

1.3.1. Квантова теорія світла для просторової роздільної здатності

2000 року керівник наукової групи Європейської лабораторії молекулярної біології Гейдельбергу в Німеччині доктор Ернст Стельцер, дослідив просторову роздільну здатність мікроскопа з точки зору квантової невизначеності.

За принципом Гайзенберга добуток невизначеності положення і імпульсу фотона дорівнює постійній величині, а отже невизначеність фотонної координати може бути обчислена як зворотний продукт невизначеності фотонного імпульсу. Невизначеність імпульсу може бути охарактеризована як стандартне відхилення імпульсів фотонів на апертурний кут (рис.1.12). Це залежить тільки від числової апертури і довжини хвилі. Доведено, що невизначеність координат фотона в бічному напрямку пропорційна відношенню довжини хвилі до числової апертури так само, як і в формулі Аббе. Також невизначеність координат фотона в осьовому напрямку пропорційна долі довжини хвилі до квадрата числової апертури, як у формулі для розрахунку глибини фокуса.

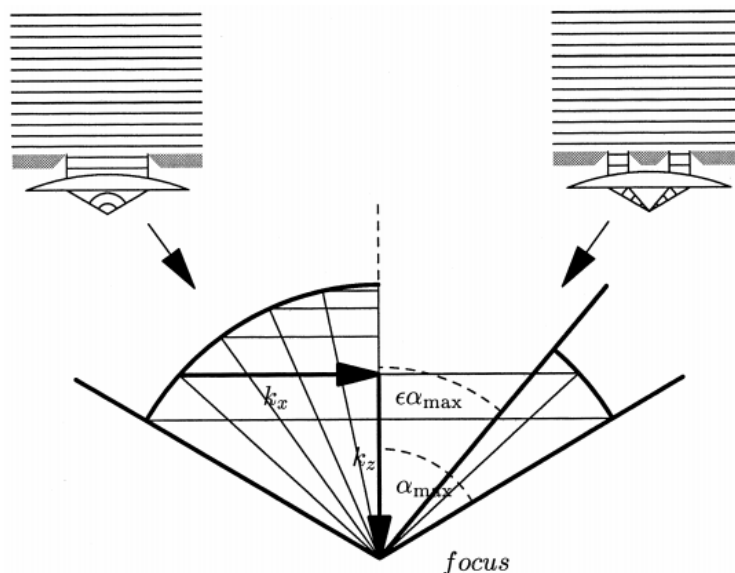


Рис.1.12 – Розподіл імпульсу в апертурі

Розподіл бічних імпульсів k визначає поперечний k_x розподіл інтенсивності в фокальній області; розподіл осьових імпульсів k_z призводить до розподілу осьової інтенсивності в зоні z -фокуса. Ліва сторона ілюструє приклад кругової апертури; на правій стороні показано кільцевий отвір. Динамічний діапазон у фокальній області щодо інтенсивності в обох випадках однаковий.

Звичайно, фізичний сенс мінімального розділення і невизначеності координат фотонів різні: границя розділення є визначеною величиною, яка може бути розрахована на основі теорії хвильової дифракції; невизначеність є скоріше статистичною оцінкою, отриманою за допомогою квантової теорії. Але той факт, що теорія Аббе і теорія, засновані на принципі невизначеності Гейзенберга, пов'язані, є вкрай важливим.

1.3.2. Квантового еквівалент тривимірної просторової смуги пропускання

В описаній вище монографії проф. Боровицького також був описаний розгляд просторової роздільної здатності з точки зору квантової теорії світла, адже основний принцип квантової оптики - принцип невизначеності

Гейзенберга - може бути застосований для оцінки квантового еквівалента тривимірної просторової пропускної здатності оптичної системи. Був введений т.зв. квантовий еквівалент просторової частоти зрізу. Цей еквівалент обчислюється з використанням принципу невизначеності Гейзенберга, і пропорційний зворотному добутку стандартного відхилення координати фотона, коли джерело фотонів нахилено відносно оптичної осі об'єктива (рис.1.13)

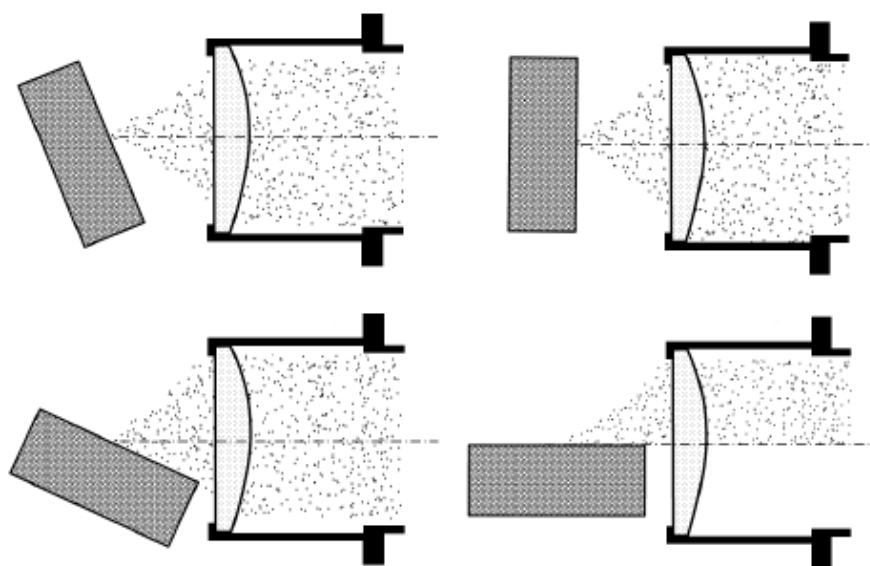


Рис.1.13 – Квантова роздільна здатність

В аналітичній формі вона визначається як функція апертурного кута мікрооб'єктива, кута нахилу джерела фотонів і довжини хвилі. Форма і розміри досить близькі до просторової частоти зрізу. Запропонований математичний апарат може розглядатися як квантове представлення та підтвердження запропонованого розширення теорії Аббе до тривимірного простору.

Проф. Боровицький дослідив невизначеність координати фотона вздовж похилого напрямку і її стандартне відхилення. Квантовий еквівалент просторової частоти зрізу визначається як зворотний продукт цього стандартного відхилення. Вона характеризує 3D просторову пропускну

здатність через конфіденційний інтервал координати фотона з заданою ймовірністю введення в неї координати фотонів.

Значення квантового еквівалента і просторових частот зрізу дуже близькі один до одного. Цей важливий факт свідчить про глибокий взаємозв'язок між хвильовою та квантовою природою світла у формуванні тривимірних зображень.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		33

Розділ 2. Фізико-математична модель

Як відомо, одним із можливих розв'язків хвильового рівняння є плоска монохроматична хвиля: $E(x, t) = E_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right]$,

де E_0 – амплітуда, φ_0 – початкова фаза, $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота.

Величина $\varphi(x, t) = \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0$ називається фазою хвилі

При $\varphi_0 = 0$ і $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число – маємо:

$$E(x, t) = E_0 \cos[kx - 2\pi\nu t]$$

В комплексному вигляді: $E(x, t) = E_0 \exp[i(kx - 2\pi\nu t)]$

Наступним важливим розв'язком є сферичний хвильовий фронт у вигляді концентричних сфер, які надходять від точкового джерела:

$$E(r, t) = \frac{E_0}{r} \exp[i(kr - 2\pi\nu t)]$$

де E_0 – амплітуда сферичної хвилі одиничного радіусу r .

Ще один розв'язок – циліндричні хвилі, хвильовий фронт яких є циліндричною поверхнею:

$$E(r, t) = \frac{E_0}{\sqrt{r}} \exp[i(kr - 2\pi\nu t)]$$

де E_0 – амплітуда циліндричної хвилі одиничного радіусу r .

Нехай на лінзу з фокусною відстанню f падає монохроматична світлова хвиля з комплексною амплітудою $E_0(x', y')$, де (x', y') – поперечні Декартові координати в площині лінзи. Тоді комплексна амплітуда хвилі після проходження лінзи: $E(x', y') = E_0(x', y') \cdot t(x', y')$,

де $t(x', y')$ – комплексний амплітудний коефіцієнт пропускання лінзи.

Якщо не враховувати френелівські втрати, такий коефіцієнт може бути представлений в наступній формі: $t(x', y') = \exp[i\varphi(x', y')]$,

де $\varphi(x', y')$ – фазовий зсув, який вносить лінза. Він може бути розрахований через відстань між площиною безпосередньо до першої поверхні лінзи і площиною після останньої її поверхні, яка дорівнює максимальній товщині лінзи $d_0 = d(x', y') + [d_0 - d(x', y')]$,

де $[d_0 - d(x', y')]$ - товщина повітряного простору між цими двома площинами (поверхнями лінзи).

Тоді: $\varphi(x', y') = knd(x', y') + k[d_0 - d(x', y')]$,

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - хвильове число, а n - показник заломлення лінзи.

При підстановці отримуємо:

$$t(x', y') = \exp(ikd_0)\exp[ik(n - 1)d(x', y')]$$

Функцію товщини лінзи можна представити залежно від основних параметрів лінзи, поділивши на дві частини:

$$d(x', y') = d_1(x', y') + d_2(x', y'); \quad d_0 = d_{10} + d_{20}$$

Виходячи з геометричних розрахунків (рис.2.1) маємо:

$$d_1(x', y') = d_{01} - \left[r_1 - \sqrt{r_1^2 - (x'^2 + y'^2)} \right] = d_{01} - r_1 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_1^2}} \right]$$

$$d_2(x', y') = d_{02} - \left[-r_2 + \sqrt{r_2^2 - (x'^2 + y'^2)} \right] = d_{02} + r_2 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_2^2}} \right]$$

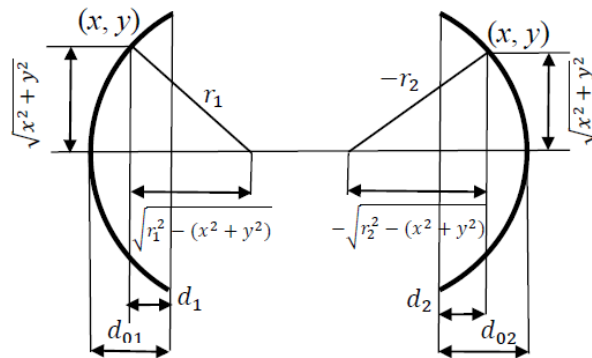


Рис.2.1 – геометрична модель тонкої лінзи

При поєднанні отримуємо:

$$d(x', y') = d_0 - r_1 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_1^2}} \right] + r_2 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_2^2}} \right]$$

Для спрощення розрахунків розглянута параксіальна область, де:

$$\frac{(x'^2 + y'^2)}{r_1^2} \ll 1; \quad \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_2^2} \ll 1$$

а отже:

$$\sqrt{1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_1^2}} \approx 1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{2r_1^2}; \quad \sqrt{1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{r_2^2}} \approx 1 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{2r_2^2}$$

Таким чином функція товщини лінзи має наступний вигляд:

$$d(x', y') = d_0 - \frac{(x'^2 + y'^2)}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Виходячи з такого результату отримуємо параксіальне наближення амплітудного коефіцієнту пропускання лінзи:

$$t(x', y') = \exp(iknd_0) \exp \left[-ik(n-1) \frac{(x'^2 + y'^2)}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$$

Множник $\exp(iknd_0)$ вносить постійну фазову затримку, тож його не враховуємо; а власні параметри лінзи можна об'єднати, використовуючи відому формулу: $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$, де f – фокусна відстань лінзи.

Отже, кінцевий варіант формули для представлення комплексного пропускання тонкої лінзи [22] матиме вигляд:

$$t(x', y') = \exp[-ik(x'^2 + y'^2)/2f]$$

Тоді комплексна амплітуда хвилі після проходження лінзи:

$$E(x', y') = E_0(x', y') \cdot \exp[-ik(x'^2 + y'^2)/2f]$$

За лінзою хвиля поширюється відповідно до законів дифракції. [22]

Використовуючи дифракційний інтеграл в наближенні Френеля

$$E(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} e^{-ikz} \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} E_1(x', y') \exp \left\{ \frac{ik}{2z} [(x - x')^2 + (y - y')^2] \right\} dx' dy'$$

можна знайти комплексну амплітуду світлової хвилі на будь-якій відстані z від лінзи:

$$E(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp \left[ik \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z} \right) \right] \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} E_0(x', y') \exp \left\{ ik \left[\frac{x'^2 + y'^2}{2} \right] \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{f} \right) - \frac{ik}{z} (xx' + yy') \right\} dx' dy'$$

Тут (x, y) - поперечні Декартові координати в площині спостереження. Вважаючи $z = f$, знайдемо комплексну амплітуду хвилі в фокальній площині лінзи:

$$E(x, y, f) = \frac{1}{i\lambda f} \exp \left[ik \left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f} \right) \right] \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} E_0(x', y') \exp \left\{ -\frac{ik}{f} (xx' + yy') \right\} dx' dy'$$

$$\text{або} \quad E(x, y, f) = \frac{1}{i\lambda f} \exp \left[ik \left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f} \right) \right] \cdot E_0(k_x, k_y),$$

де введені позначення: $k_x = \frac{kx}{f}$, $k_y = \frac{ky}{f}$

Величина $E_0(k_x, k_y)$ визначається виразом:

$$E_0(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E_0(x', y') \exp \{ -i(k_x x' + k_y y') \} dx' dy'$$

і називається просторовою спектральною амплітудою світлового поля $E_0(x, y)$

Остання формула показує, що в фокальній площині лінзи формується розподіл поля, пропорційний просторовому Фур'є-образу поля, що падає на лінзу.

Кутовим (просторовим) спектром випромінювання називається величина, що дорівнює квадрату модуля просторової спектральної амплітуди поля: $S(k_x, k_y) = |E(k_x, k_y)|^2$, тому розподіл інтенсивності світла в фокальній площині лінзи має форму кутового спектра випромінювання, що падає на лінзу [22], а саме: $I(x, y, f) = |E(x, y, f)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 f^2} S_0(k_x, k_y)$

Розрахуємо розподіл інтенсивності (енергії) у задній фокальній площині мікрооб'єктиву, коли у передній фокальній площині розташована ґратка, яка може нахилитися на певний кут відносно оптичної осі мікрооб'єктиву. Будемо

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		37

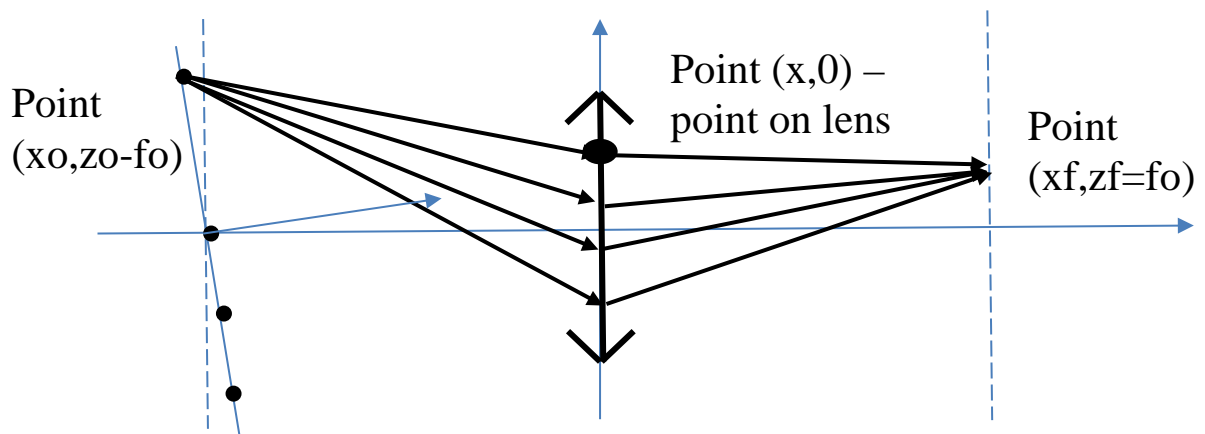
використовувати скалярну теорію дифракції для двовимірного випадку – координатна площина (x,z). Гратка – набір точкових джерел випромінювання з кроком d. Якщо гратка перпендикулярна до оптичної осі, то координати точкових джерел будуть:

$$x_k = k \cdot d; \quad Z_k = -f_0; \quad k \in [-N_{gr}; N_{gr}] - \text{номер точкового джерела}$$

Якщо гратка нахилена оптичної осі, то координати точкових джерел будуть: $x_k = k \cdot d \cdot \cos(\alpha); \quad Z_k = k \cdot d \cdot \sin(\alpha) - f_0$

Оптичну систему апроксимуємо тонкою лінзою (мала апертура, невелике поле зору) з передавальною функцією: $t(z) = \exp\left(\frac{z^2}{2f_0}\right)$

Розподіл комплексної амплітуди поля розраховуємо в задній фокальній площині мікрооб'єктиву за наступною схемою (рис.2.2):



Розраховуємо елементарну складову амплітуди: гратка освітлюється плоским хвильовим фронтом, кожна точка (x₀, z₀) є точковим джерелом та «освітлює» лінзу вторинним хвильовим фронтом, цей фронт проходить через лінзу в точці (0, x) та набуває фазового зсуву, після чого точку (0, x) можна розглядати як точкове джерело, яке випромінює сферичну хвилю та освітлює задню фокальну площину (x_f, z_f), пам'ятаючи рівняння сферичної хвилі амплітуди в точці (x₂, z₂), якщо сферична хвиля виходить з точці (x₁, z₁):

$$E_0(x_1, z_1, x_2, z_2) = E_0 \cdot \frac{\exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}\right]}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}$$

Тоді:

$$E_P(x_0, z_0, x, x_f, z_f) = E_0 \cdot \exp\left(\frac{i2\pi z}{\lambda}\right) \cdot \frac{\exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2}\right]}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2}} \cdot$$

$$\cdot t(x) \cdot \frac{\exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}\right]}{\sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}} = E_0 \cdot$$

$$\cdot \frac{\exp\left\{\frac{i2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2} + \frac{x^2}{2f_0} + \sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}\right]\right\}}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2} \cdot \sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}}$$

1) Інтегруємо по апертурі лінзи (координата x) та отримуємо вираз комплексної амплітуди, яку формує одне точкове джерело ґратки:

$$E_{FP}(x_0, z_0, x_f, z_f) = \int_{-X_a}^{X_a} E_P(x_0, z_0, x, x_f, z_f) \cdot dx =$$

$$= \int_{-X_a}^{X_a} E_0 \cdot \exp\left(\frac{i2\pi z_0}{\lambda}\right) \cdot \frac{\exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2}\right]}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2}} \cdot t(x) \cdot$$

$$\cdot \frac{\exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}\right]}{\sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}} \cdot dx = E_0 \cdot$$

$$\cdot \int_{-X_a}^{X_a} \frac{\exp\left\{\frac{i2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2} + \frac{x^2}{2f_0} + \sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}\right]\right\}}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - f_0)^2} \cdot \sqrt{(x - x_f)^2 + (f_0 + z_f)^2}} dx$$

2) А тепер сума усіх точкових джерел ґратки – розподіл амплітуди, яку створює ґратка:

$$E_{GR}(a, d, x_f) = \sum_{k=-N_{gr}}^{N_{gr}} E_{GR}[k \cdot d \cdot \sin(\alpha), k \cdot d \cdot \cos(\alpha), x_f, 0]$$

3) Розраховуємо інтенсивність: $I_{GR}(a, d, x_f) = |E_{GR}(a, d, x_f)|^2$

Побудувавши графіки в програмі MathCad (рис.2.2) можна побачити, що при збільшенні кута нахилу предмета дифракційні максимуми в площині первинного зображення «розходяться».

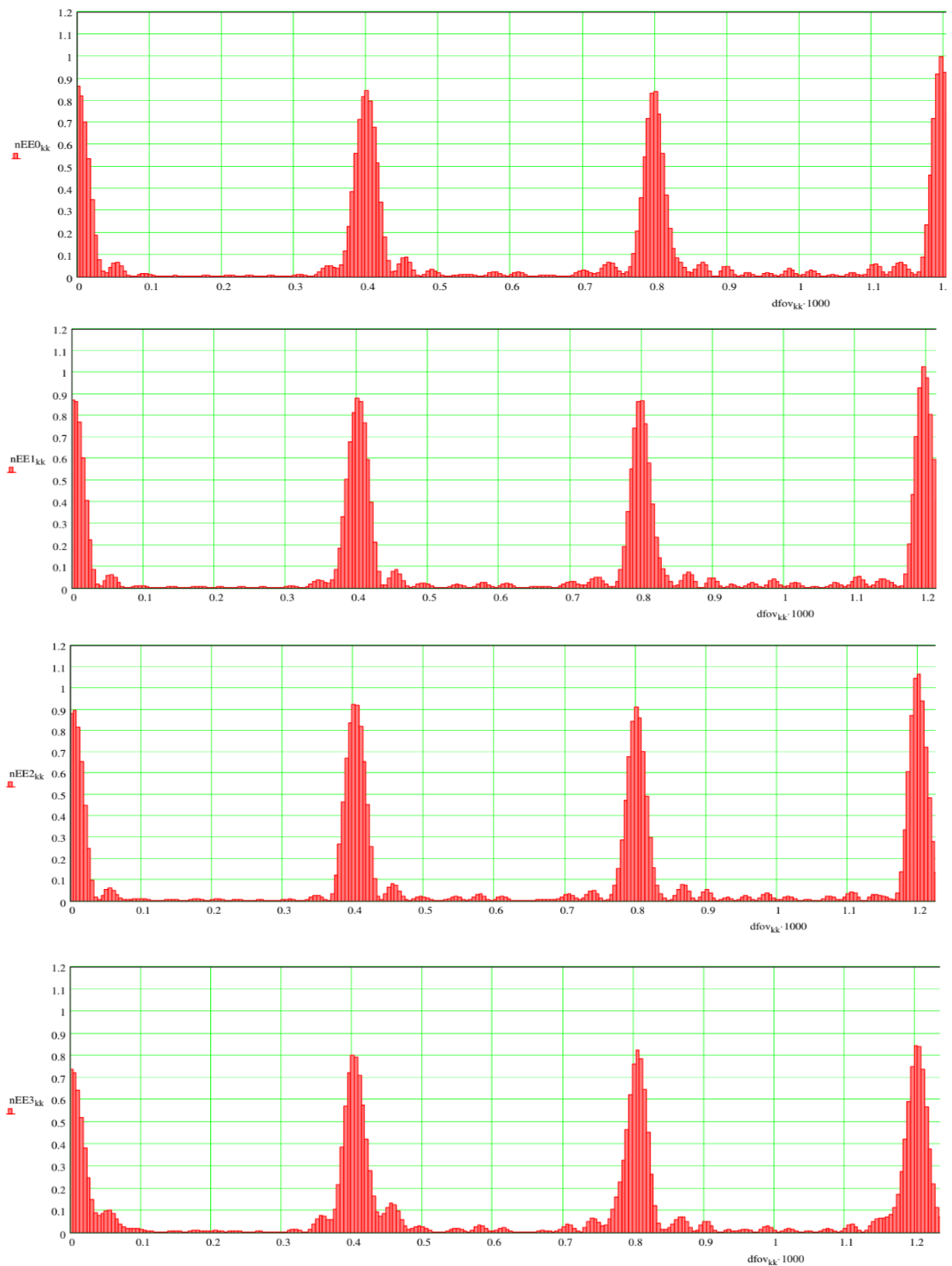


Рис.2.2 – «Розходження» максимумів при повороті ґратки

Розділ 3. Установка для експерименту

3.1. Установка для демонстрації первинного і вторинного зображення досліду Аббе-Портера на одному екрані

Під час виконання бакалаврського дипломного проекту було розроблено та створено кілька прототипів приладу для демонстрації досліду Аббе-Портера, який дозволяв спостерігати первинне зображення (спектр об'єкту-гратки) та вторинне зображення (збільшене зображення решітки) одночасно на єдиному екрані, остання модифікація мала досить просту і надійну будову (рис.3.1).

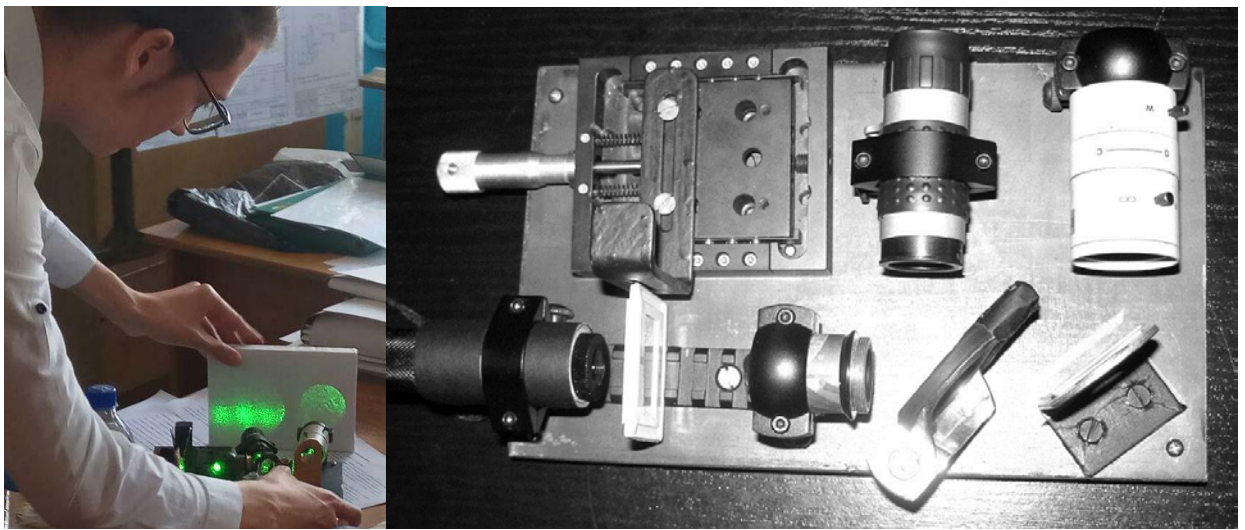


Рис.3.1 – Захист диплому бакалавра зі згаданою установкою 2017 року

Джерело когерентного освітлення (зелений лазер з довжиною хвилі 532 нм та потужністю 1000 мВт) і мікрооб'єктив (збільшення 10х, апертура 0,25) були закріплені в кронштейнах та встановлені на єдину довгу планку. Об'єкта (один з набору дифракційних ґраток з різною постійною ґратки) розташовувався між джерелом та мікрооб'єктивом, і був зафіксований на рухомій платформі Standa з мікрометром. Далі система ділилась на два канали – первинного і вторинного (за теорією Аббе) зображення.

Канал для побудови первинного зображення складався з напівпрозорого дзеркала, яке виступало в якості поділювача пучка, і монокуляра зі збільшенням 7х. Канал для побудови вторинного зображення містив дзеркало і об'єктив. Таким чином за допомогою двох цих каналів було можливо

побудувати спектр та збільшене зображення решітки в одній площині екрану з порівняно однаковою роздільною здатністю.

Після захисту бакалаврського дипломного проекту установка була неодноразово видозмінена та модифікована.

3.2. Вдосконалення каналу первинного зображення для демонстрації одновимірної решітки

У останній версії макету приладу для бакалаврського дипломного проекту монокуляр, що формував на екрані первинне зображення (зображення спектру об'єкту-решітки), давав візуально надмірне збільшення такого зображення, а також поле його зору було недостатнім. Такий недолік вимагав деяких доробок.

Таким чином до монокуляру за допомогою саморобного з'єднувального кільця було приєднано невелику фокусуючу лінзу, близьку за діаметром до вхідного отвору монокуляру, і встановлено на платформу. Після цього зображення спектру являє собою набагато більш чіткі дискретні плями, які більше приближаються до вигляду точки (рис.3.2). Збільшення було значно оптимізоване, а поле зору приємно збільшилося.

Напівпрозоре дзеркало пропускало доволі невелику кількість світлового потоку, особливо на відміну від відбитої частини світла, яка будувала дуже яскраве первинне зображення. Від цього вторинне зображення дифракційної ґратки було дуже тьмяним, і розгледіти в ньому періодичну структуру, особливо високочастотної ґратки, було вкрай важко.

Таким чином напівпрозоре дзеркало було замінено на просту невелику скляну плоско-паралельну пластинку малої товщини, після чого яскравість вторинного зображення стала помітно більш яскравою, а яскравість вторинного зображення – набагато більш задовільною (рис.3.2).

На відміну від круглого напівпрозорого дзеркала нова пластинка мала прямокутну форму, від чого необхідно було також розробити новий

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		42

кронштейн для її кріплення, який нині набагато компактніший за попередній (рис.3.2).

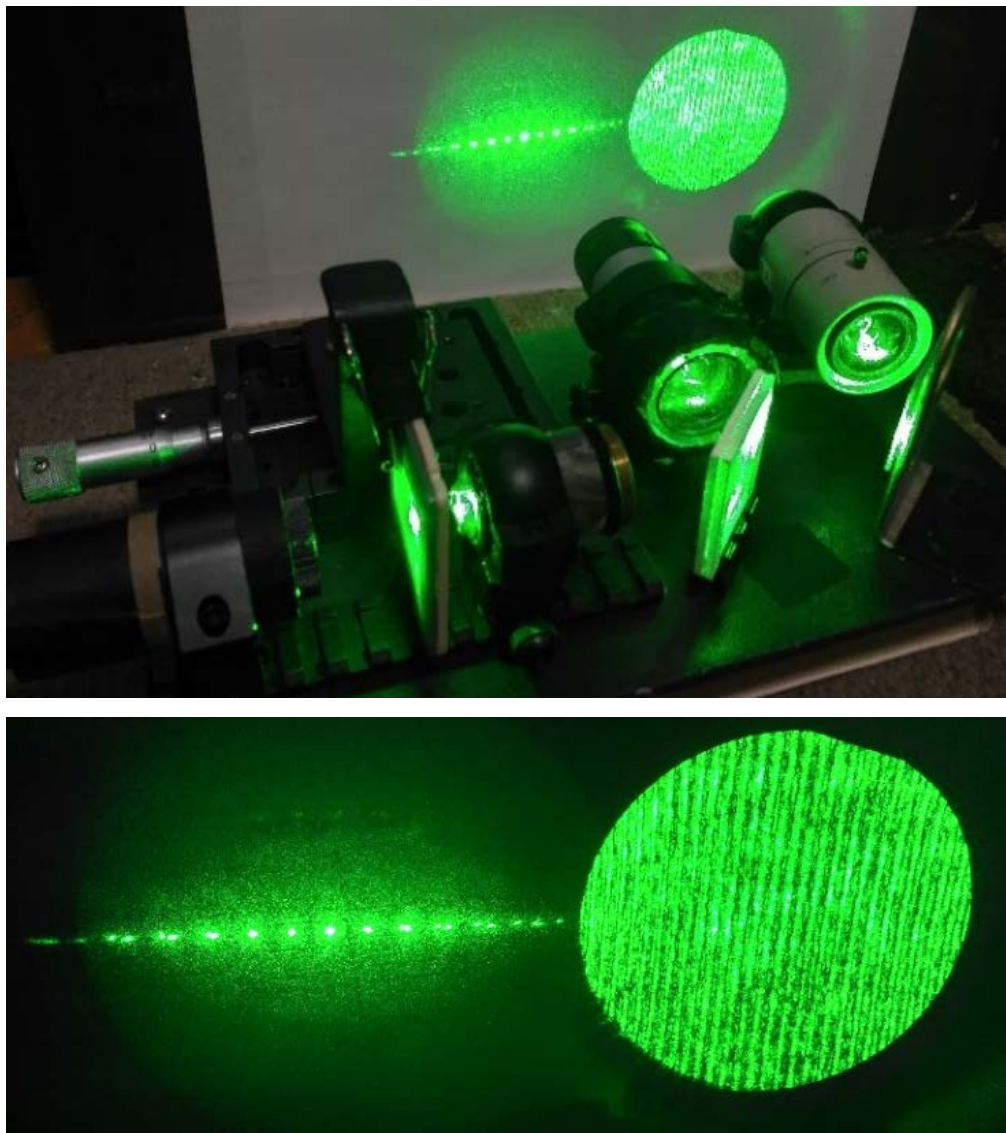


Рис.3.2 – Установка після першого вдосконалення

3.3. Одночасне отримання спектру та зображення двовимірної дифракційної решітки

Вдосконалену установку для демонстрації досліду Аббе-Портера було використано для одночасної побудови первинного та вторинного зображень двовимірної дифракційної ґратки (рис.3.3).

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		43

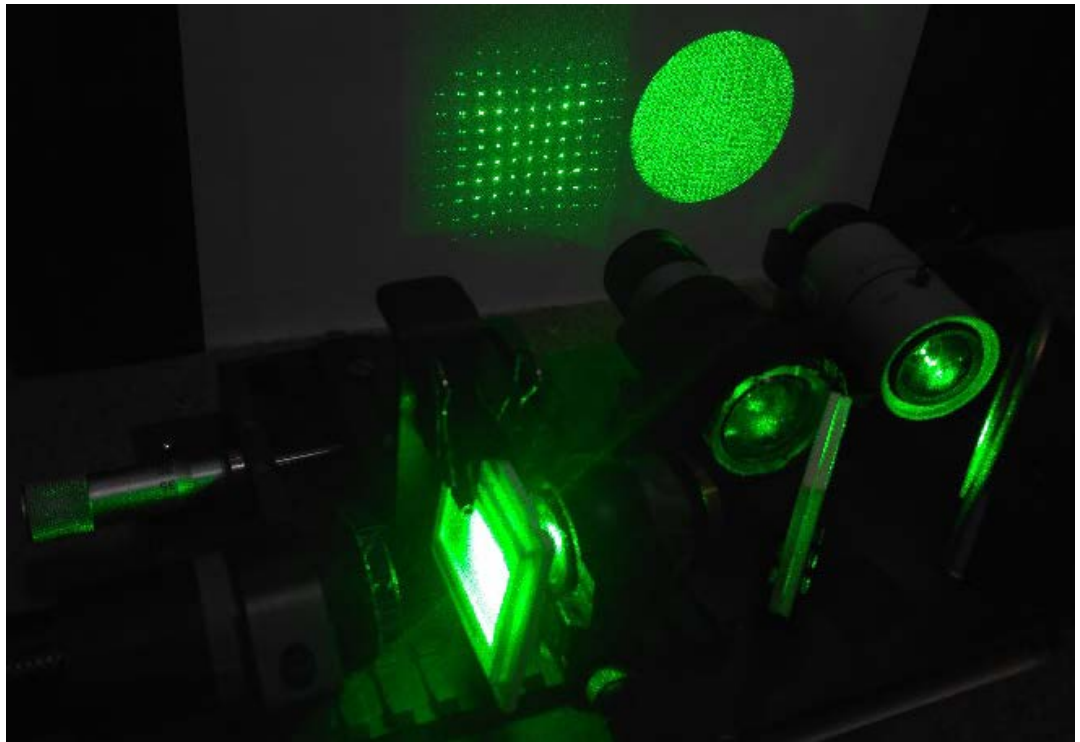


Рис. 3.3 – Побудова спектру та зображення двовимірної ґратки на одному екрані

Спектр такої решітки являє собою двовимірний масив (матрицю) з яскравих дифракційних максимумів, а вторинне зображення – сітку з перпендикулярно схрещених між собою штрихів – вертикальних і горизонтальних (рис.3.4).

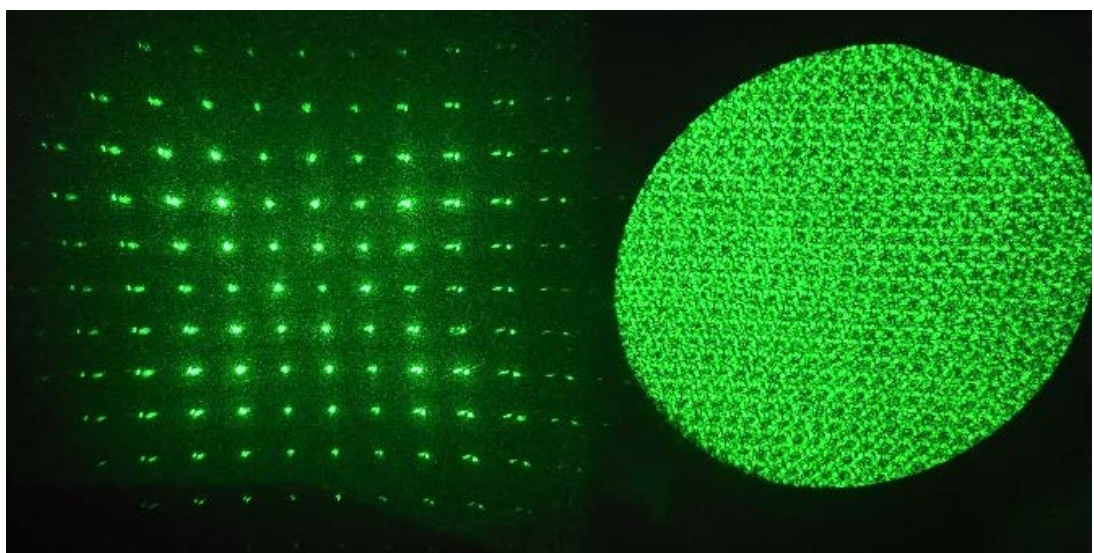


Рис.3.4 – Спектр та зображення двовимірної решітки

3.4. Результати при накладанні маски у вигляді щілини

За допомогою пластикового різьбового кільця та непрозорої клейкої стрічки з вирізу у вигляді тонкого протяжного отвору у площині первинного зображення вдалось встановити маску у вигляді щілини.

У випадку, коли маска являє собою горизонтальну щілину (рис.3.5), вторинне зображення двовимірної решітки складається лише з вертикальних смуг (рис.3.6).

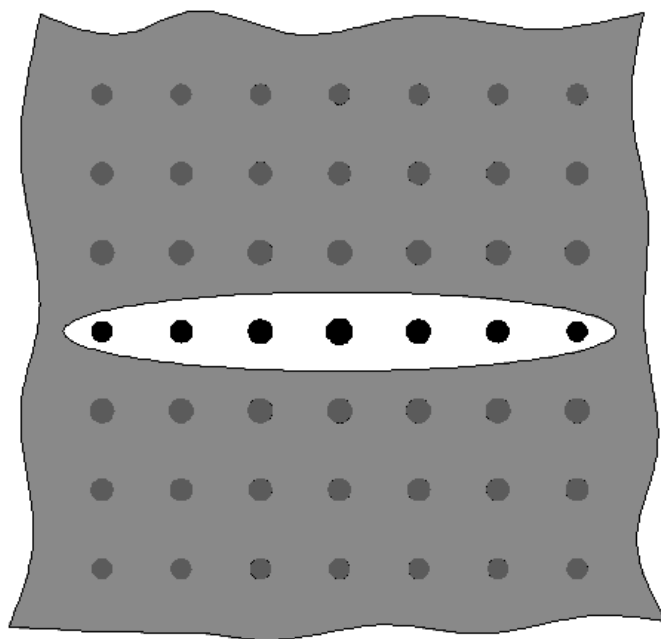


Рис.3.5 – Маска є горизонтальною щілиною

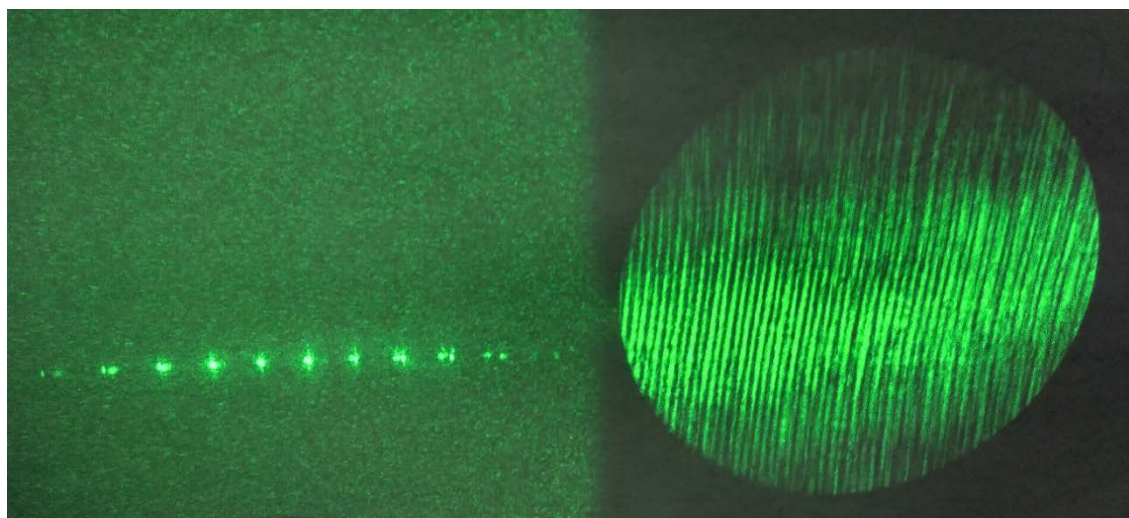


Рис.3.6 – Спектр та зображення при горизонтальній щілині

Як видно з малюнку, після фільтрації спектру маскою з горизонтальною щілиною первинне зображення являє собою набір горизонтальних яскравих точок – дифракційних максимумів. Отже така фільтрація приводить спектр двовимірної дифракційної ґратки до вигляду, ідентичного випадку одновимірної решітки з вертикальними штрихами. Таким чином в площині вторинного зображення і спостерігаємо періодичну структуру з вертикальних штрихів.

Повернувши кільце з горизонтальним отвором на 90 градусів маска являє собою вертикальну щілину (рис.3.7), тож вторинне зображення двовимірної решітки складається лише з горизонтальних смуг (рис.3.8).

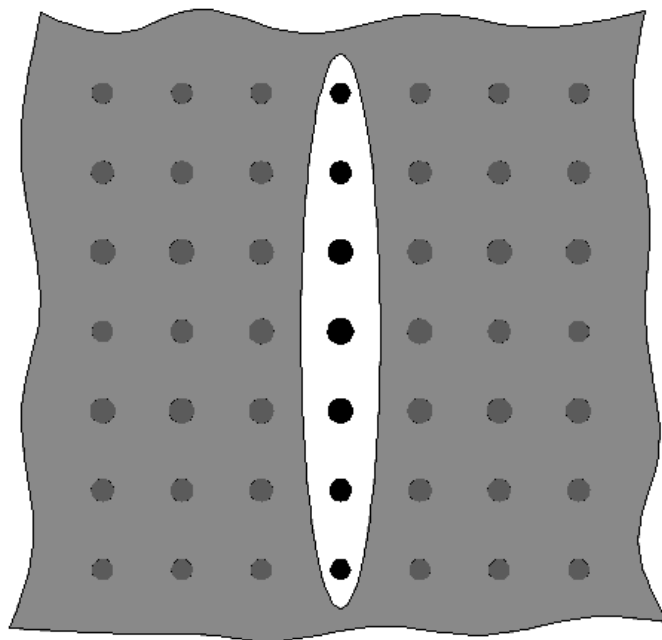


Рис.3.7 – Маска є вертикальною щілиною

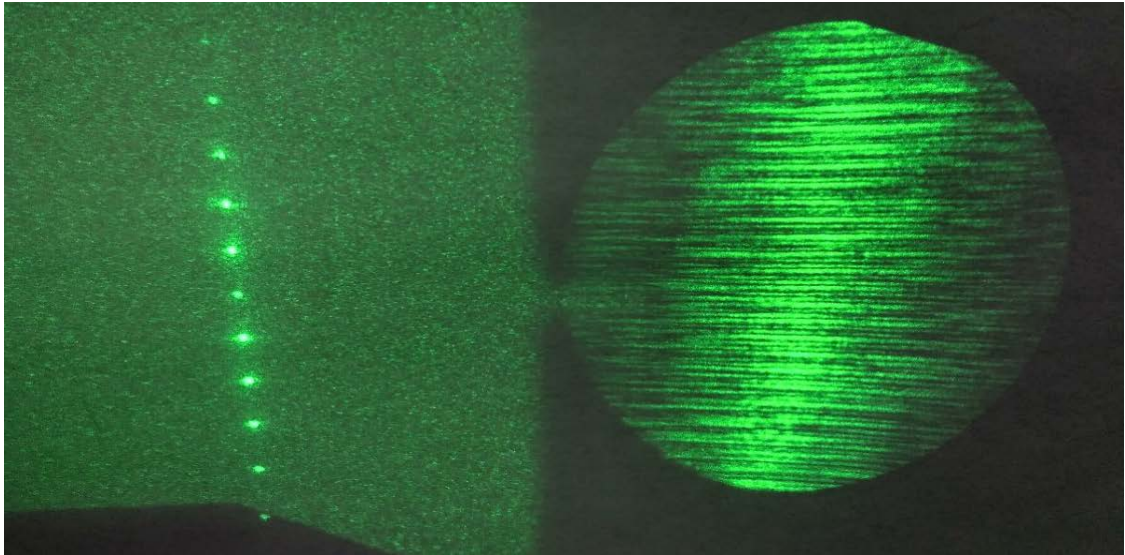


Рис.3.8 – Спектр та зображення при вертикальній щілині

Таке розміщення щілини приводить спектр двовимірної дифракційної ґратки до вигляду, ідентичного випадку одновимірної решітки з горизонтальними штрихами. Таким чином в площині вторинного зображення і спостерігаємо періодичну структуру з горизонтальних штрихів.

При повороті кільця з отвором на 45 градусів відносно його вертикального чи горизонтального положення щілина розміщується по діагоналі (рис.3.9).

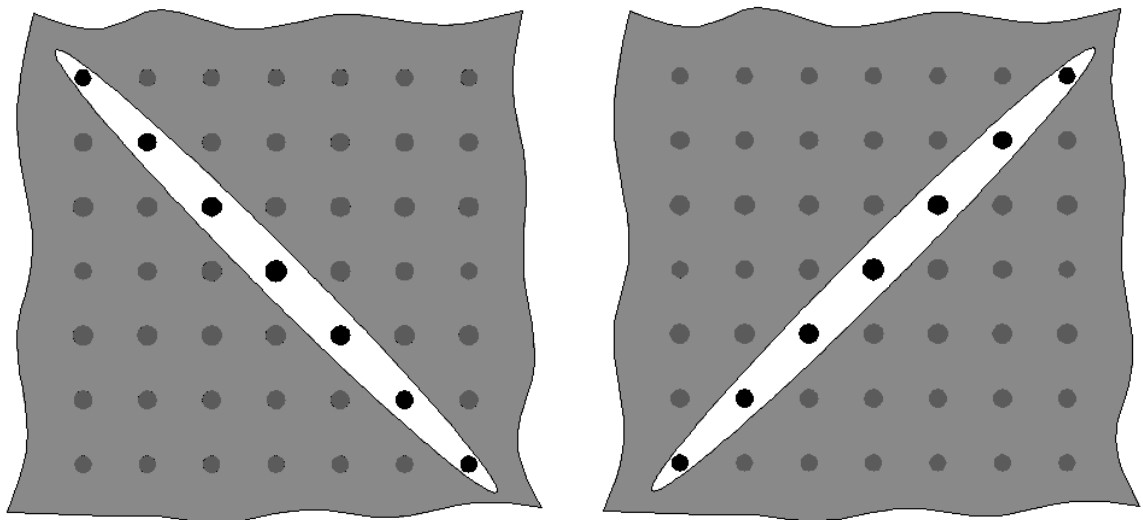


Рис.3.9 – Маска є діагональною щілиною

Тоді вторинне зображення являє собою набір смуг, розташованих перпендикулярно відносно положення щілини (рис.3.10).

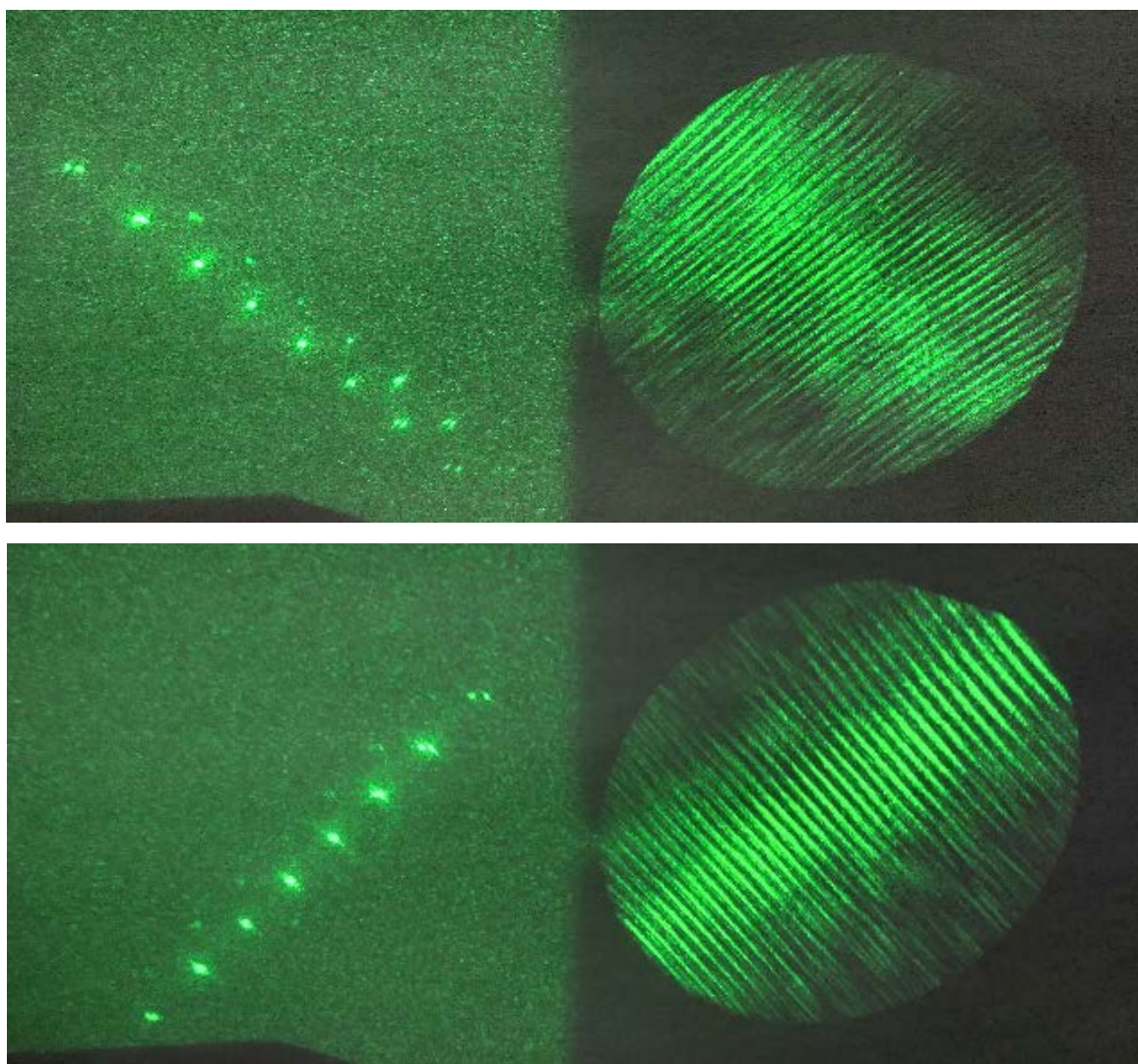


Рис.3.10 – Спектр та зображення при діагональній щілині

На рисунку 3.11 можна побачити загальний вигляд установки з діагональною фільтрацією спектра.

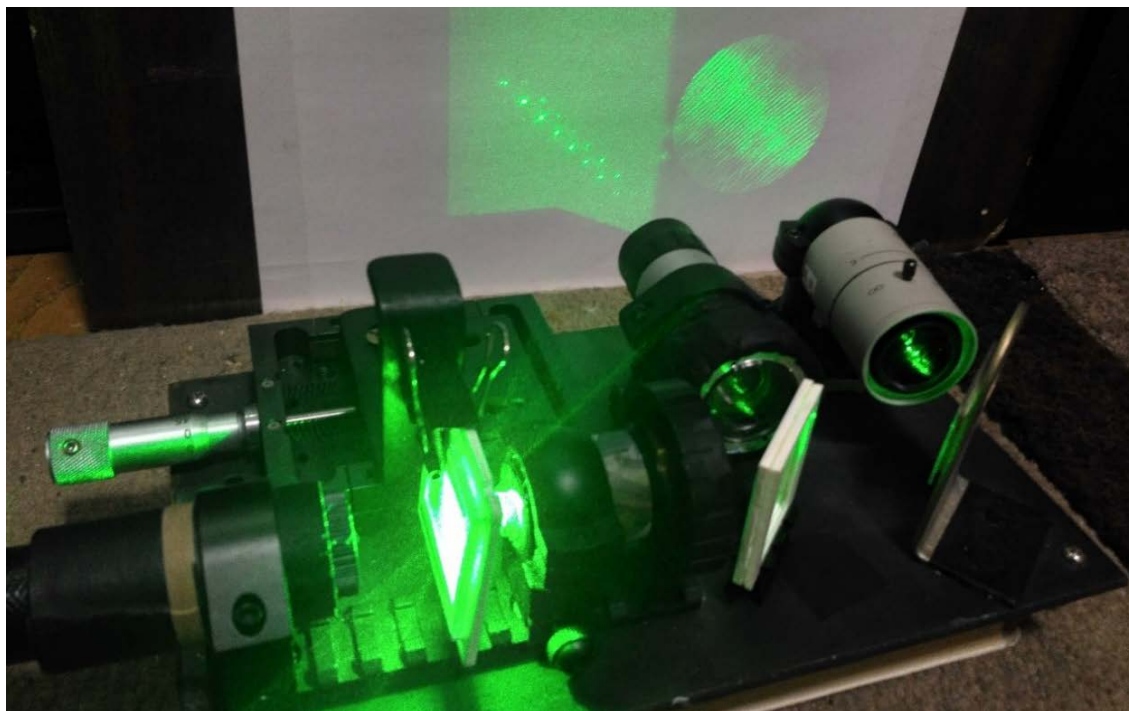


Рис.3.11 – Побудова спектру та зображення при діагональній щілині

Таке розміщення щілини відповідає випадку, якщо одновимірна дифракційна решітка розташована під кутом 45 градусів до її вертикального чи горизонтального положення, а отже і вторинне зображення є відповідним.

3.5. Подвоєння частоти зображення решітки при закритті непарних максимумів маскою

За допомогою вищезгаданих різьбового кільця та непрозорої клейкої стрічки можливо зробити маску у вигляді вікон, що пропускають лише нульовий і парні максимуми спектру решітки: ± 2 , ± 4 і т.д.(рис.3.12).

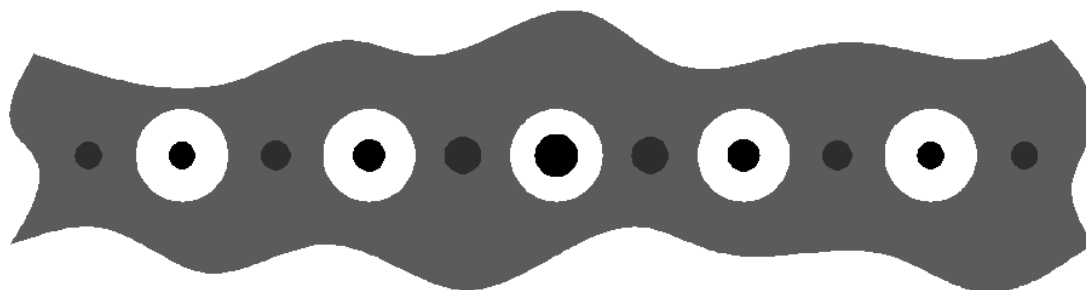


Рис.3.12 – Маска з вирізами під нульовий і парні максимуми

При встановленні такої маски в площині первинного зображення – в площині вторинного зображення спостерігається подвоєння частоти порівняно з оригінальним зображенням (рис.3.13).

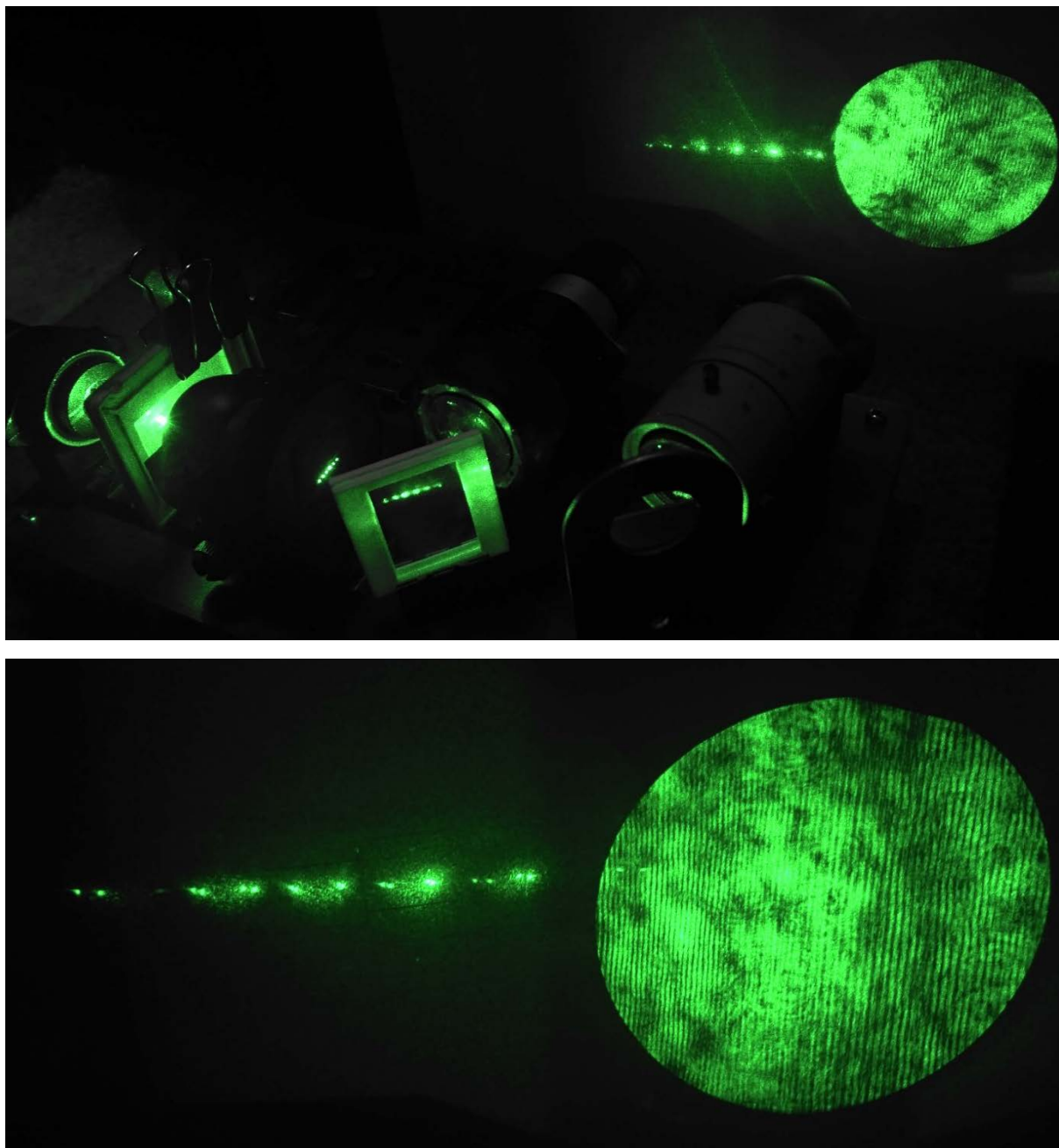


Рис.3.13 – Подвоєння частоти вторинного зображення ґратки

Справа в тому, що в результаті перекриття усіх можливих непарних максимумів період спектру збільшується вдвічі, що відповідає дифракційній ґратці з удвічі більшою частотою штрихів. Таку картину і спостерігаємо в площині вторинного зображення.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		50

3.6. Вплив повороту решітки на кут розходження дифракційних максимумів

Було проведено окремий дослід лише з каналом первинного зображення. Отримані результати зміни спектру дифракційної ґратки залежно від повороту об'єкту-решітки в площині предмету відносно оптичної осі.

При повороті дифракційної ґратки на 0, 15, 30, 45 та 60 градусів максимуми у зображенні спектру все більше розходяться по горизонталі відповідно куту повороту. (рис.3.14).

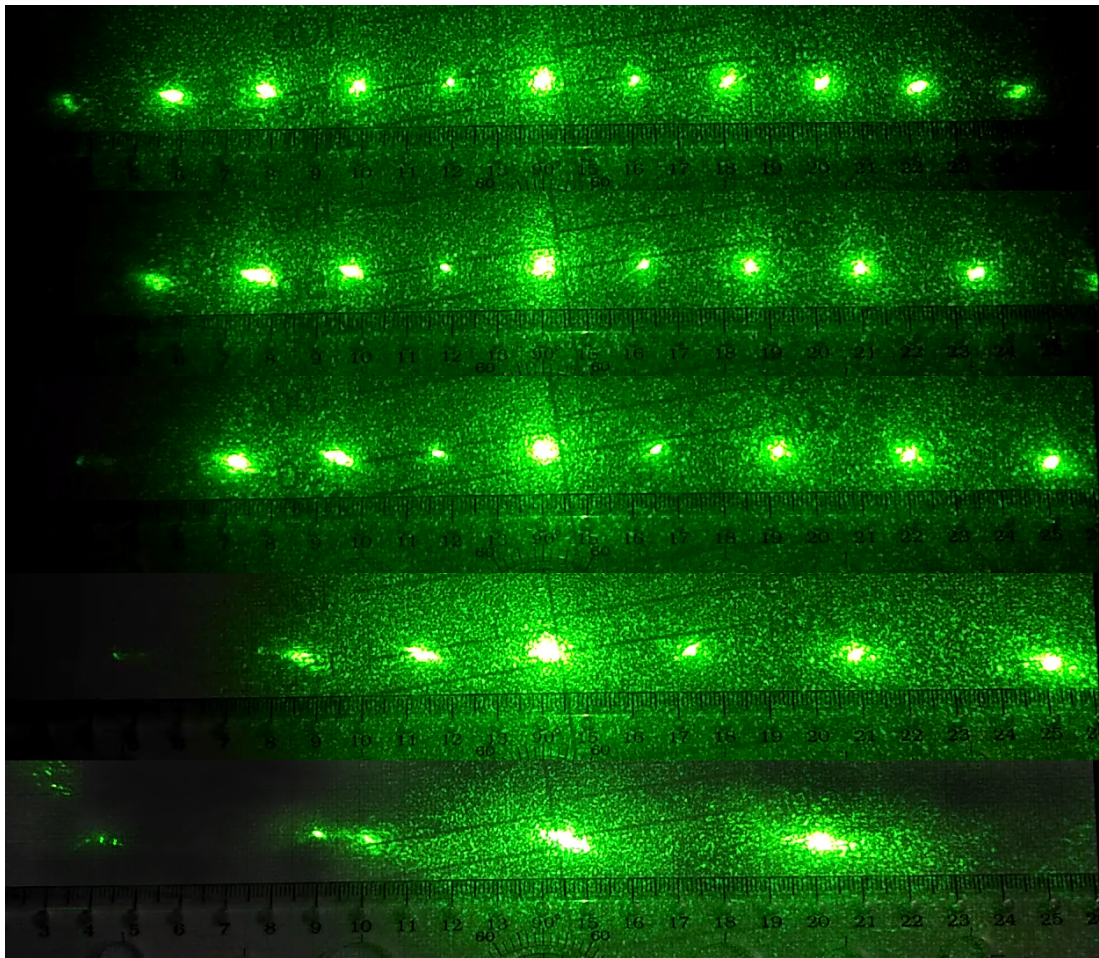


Рис.3.14 – Розходження максимумів при повороті решітки

3.7. Модифікація установки для створення блоку повороту решітки

Попередній дослід дав цікаві результати, але був дуже незручним у проведенні, тому для отримання якісніших даних з'явилась необхідність додавання окремого блоку для повороту об'єкта-решітки.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином був створений новий додатковий блок приладу, який передбачає поворот предмету відносно оптичної осі (рис.3.15).

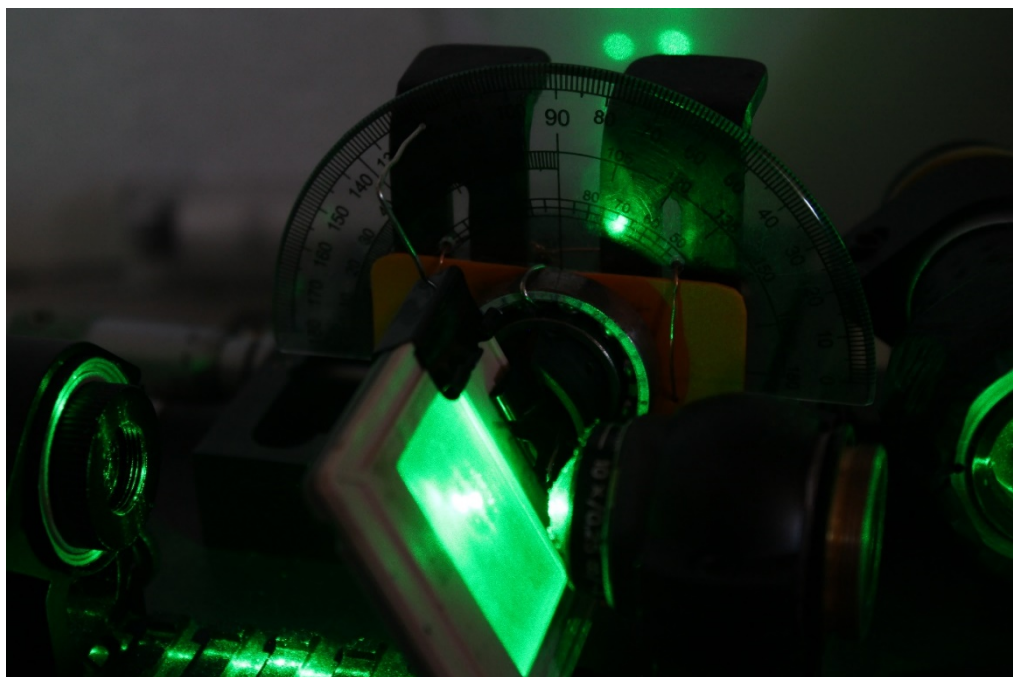


Рис.3.15 – Блок повороту дифракційної ґратки

Складається він із підшипника та шкали транспортера, прикріплених до двох кронштейнів, встановлених на рухомій платформі Standa з наявним в ній мікрометром. Остаточний вигляд установки для демонстрації досліду Аббе-Портера з похилою ґраткою показано на рисунку 3.16.

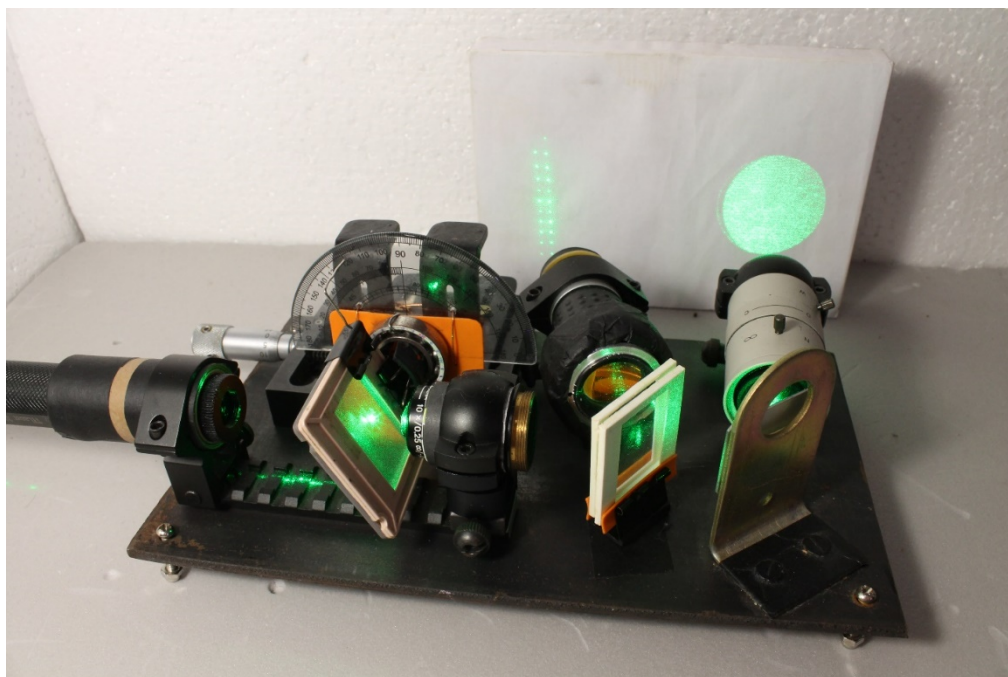


Рис.3.16 – Остаточний макет приладу

Розділ 4. Експеримент з похилою ґраткою

4.1. Вплив повороту об'єкта на первинне зображення

Як тепер відомо, експеримент Аббе-Портера є лише частинним випадком моделі побудови зображення в оптичному мікроскопі – коли об'єкт (дифракційна ґратка) перпендикулярний до оптичної осі. Хоча цей випадок і є найбільш поширеним, необхідність узагальнення теоретичної частини для інших кутів повороту решітки незаперечна. Таким чином деякий інтерес представляє отримання експериментальних даних для закріплення теоретичних розрахунків. Для збору статистики про поведінку даної системи в залежності від кута повороту такий експеримент було проведено на вищезгаданій модифікованій установці з блоком повороту дифракційної решітки. Для кожного встановленого значення кута повороту було проведено заміри відстані між дифракційними максимумами: від нульового до кожного з тих наступних, що потрапляли в поле зору (± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 та ± 5 максимумами), поки вони не почали виходити за його межі. Крок повороту предмету-решітки, який був вибраний, складав 5 градусів (від 0 до 55). Відстані між максимумами було виміряно в пікселях за допомогою програмного забезпечення Pixel Profile при однакових умовах експерименту та статичній камері (рис.4.1).

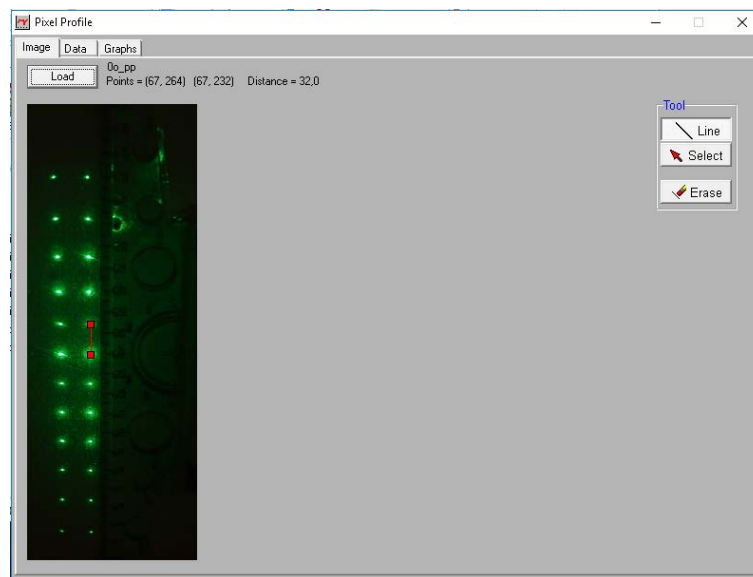


Рис.4.1 – Заміри відстаней у середовищі Pixel Profile

Усі дані, отримані після проведення такого досліду, були внесені до таблиці 4.1. Для наочності різними кольорами в таблиці вказані значення відстаней від нульового максимуму до наступних у пікселях: ± 1 – блакитний, ± 2 – червоний, ± 3 – жовто-гарячий, ± 4 – зелений та ± 5 – фіолетовий.

Таблиця 4.1. Розходження дифракційних максимумів при повороті решітки

Порядок максимуму	Кут повороту дифракційної решітки, град.											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Max [+1]	32	32	32	33	33	35	38	41	46	50	55	66
Max [+2]	66	66	67	69	71	77	80	87	96	108	123	154
Max [+3]	102	104	106	109	112	121	128	141	154	176		
Max [+4]	142	144	147	152	158	172	182	211	218			
Max [+5]	186	188	194	203								
Max [-1]	31	31	31	32	33	35	37	38	39	45	49	54
Max [-2]	62	62	63	64	66	69	71	74	78	85	93	
Max [-3]	93	93	94	95	97	101	104	110	116	125	138	
Max [-4]	123	123	123	126	128	133	139	146	153	167		
Max [-5]	153	154	154	157	160	166	173	183	191			

На основі отриманих даних можливо побудувати графіки: для додатних максимумів (рис.4.2) та для від'ємних (рис.4.3).

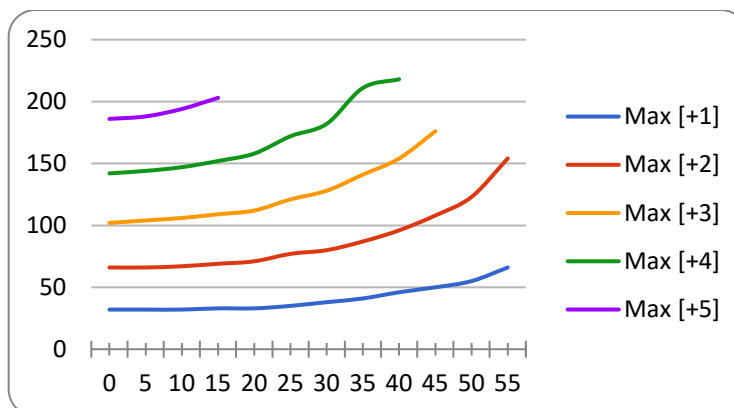


Рис.4.2 – Відстань від нуля до додатних максимумів при повороті ґратки

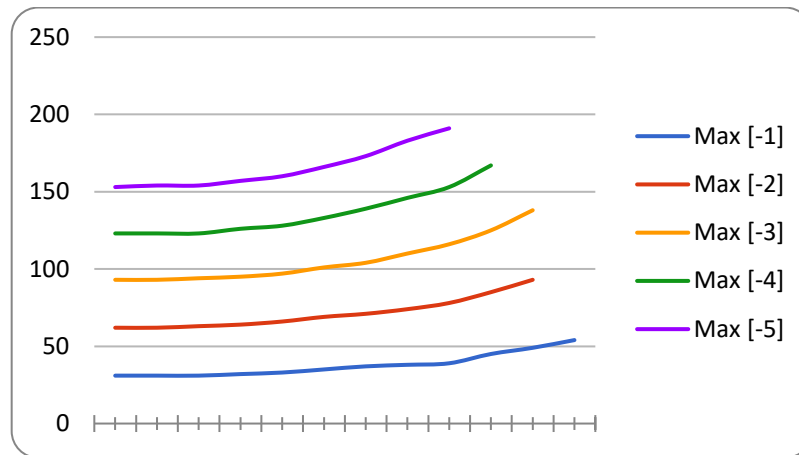


Рис.4.3 – Відстань від нуля до від’ємних максимумів при повороті ґратки

Як видно з побудованих графіків, залежність періоду розходження спектру від кута повороту дифракційної решітки приймає форму, близьку до експоненційної. Частота зображення дифракційної ґратки, яку отримуємо в площині вторинного зображення, як відомо, обернено пропорційна періоду первинного зображення, тож можна стверджувати, що експериментальні дані співпадають з розрахованими значеннями, приведеними професором Боровицьким в одній із його статей(рис.4.4)[30], а також із результатом, отриманим під час опису фізико-математичної моделі досліджу.

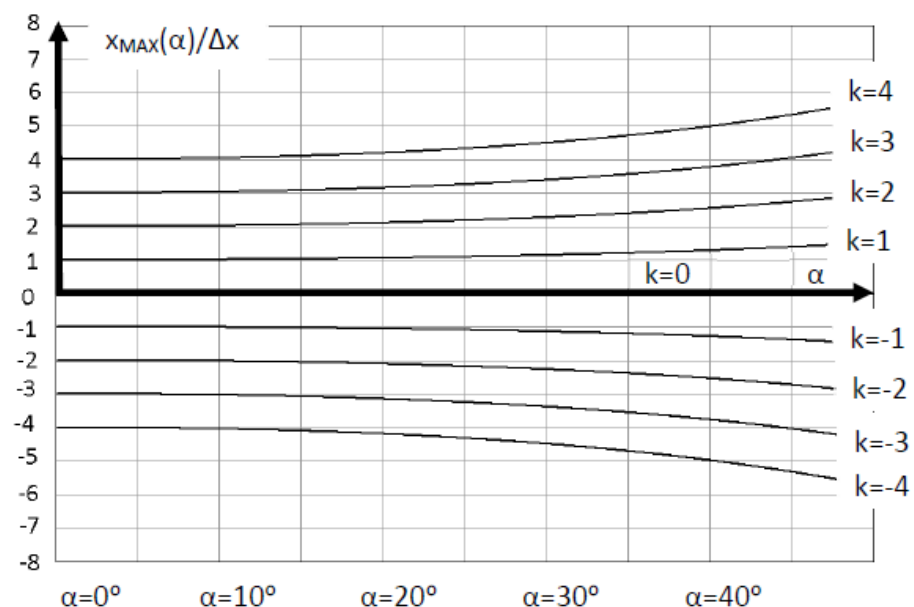


Рис.4.4 – Відстань від нуля до додатних максимумів при повороті решітки на основі теоретичних розрахунків

4.1. Вплив повороту об'єкта на вторинне зображення


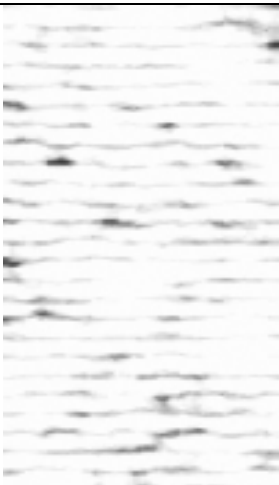

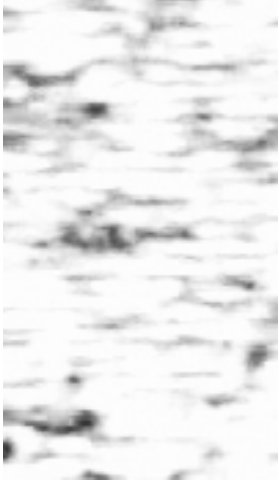


Наступним експериментом було отримання інформації про зміну вторинного зображення відповідно до кута повороту об'єкту (дифракційної решітки) і, як наслідок, відповідно до зміни первинного зображення (спектру об'єкта).



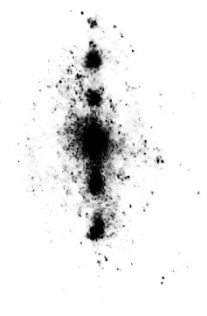
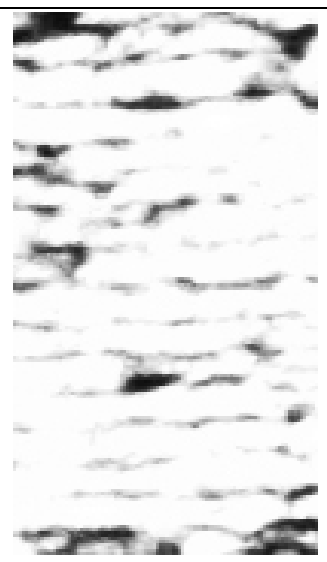

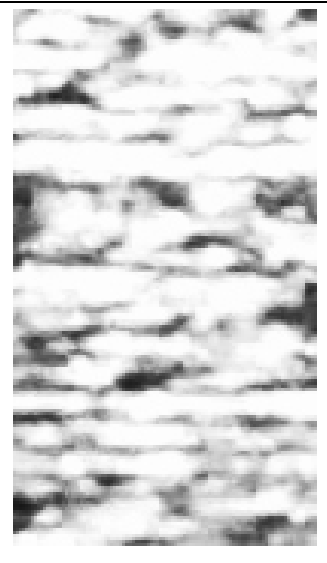
Дослід було проведено для набору з дифракційних ґраток різних форм та частоти штрихів. В таблиці 4.2 представлені первинні та вторинні зображення деяких із них: із одновимірних – решіток на 200, 100 та 55 ліній/мм, а також двовимірна ґратка на 55 ліній/мм. Для скорочення об'єму таблиці та її більш наочного вигляду представлені значення лише при повороті на 30° , 60° та без повороту. Для кожного з указаних кутів приведений спектр дифракційної решітки та відповідне збільшене зображення.

Таким чином за допомогою наочного експерименту було закріплено теоретично очевидний результат – чим більшою є відстань між дифракційними максимумами у площині первинного зображення, тим більшою є частота решітки. І дійсно, так і є: при збільшенні кута повороту решітки збільшується і частота штрихів ділянки дифракційної ґратки, яка потрапляє у мікрооб'єктив і приймає участь у формуванні первинного та вторинного зображень відповідно до теорії формування зображень в оптичному мікроскопі.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		56

Таблиця 4.2. Первинне та вторинне зображення ґратки при її повороті

Решітка, лін/мм	Поворот	Спектр	Зображення
200 лін/мм (одновимірна)	0°		
	30°		
	60°		


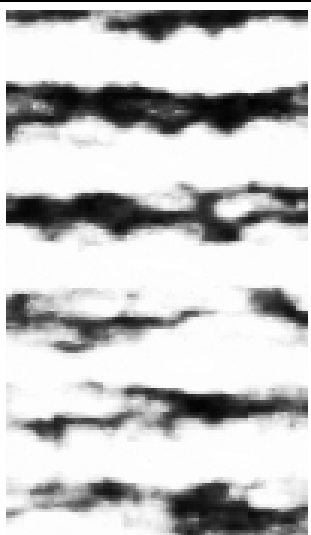

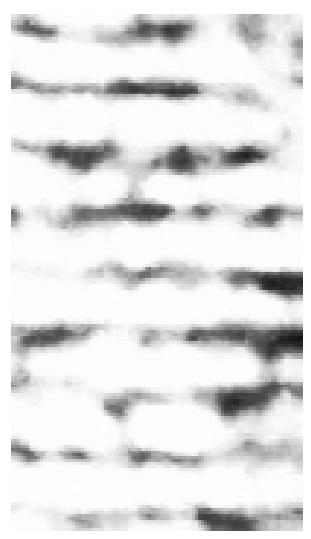

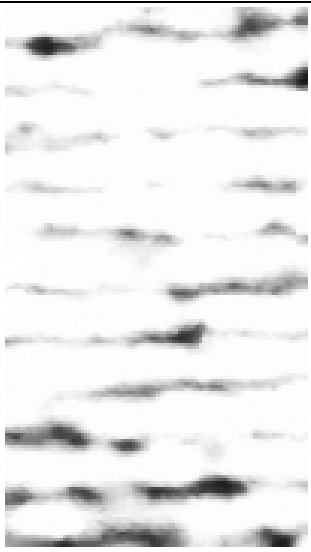
100 лін/мм (одновимірна)	0°		
	30°		
	60°		

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата

ПО71мн.0000.00 ПЗ

Арк.

58

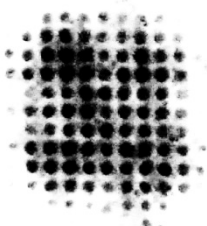
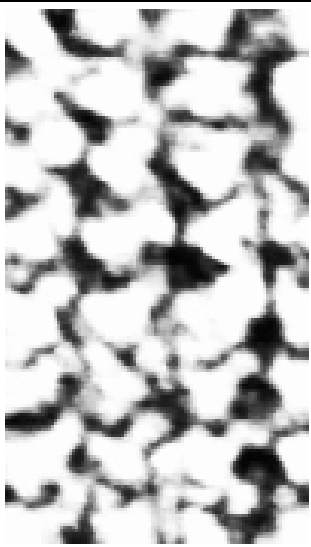
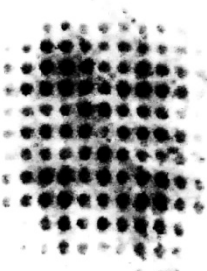
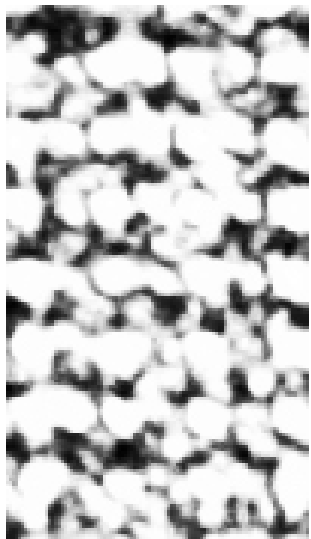

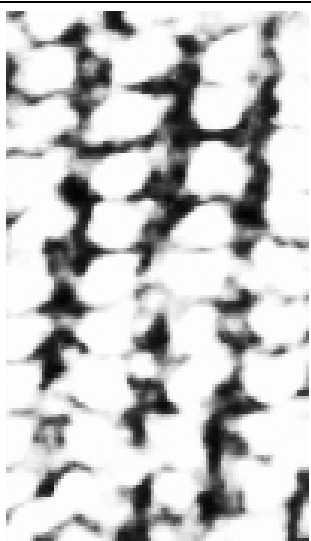
55 ліній/мм (одновимірна)	0°		
	30°		
	60°		

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата

ПО71мн.0000.00 ПЗ

Арк.

59

55 лін/мм (двовимірна)	0°		
	30°		
	60°		

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата

ПО71мн.0000.00 ПЗ

Арк.

60

Як і передбачалося, в площині первинного зображення можна спостерігати набори яскравих дифракційних плям, а в площині вторинного зображення – збільшене зображення предмету. Щоправда, із-за різного роду шумів, аберацій оптичних елементів системи а також обмеженості числової апертури системи, іноді досить важко розгледіти у вторинному зображенні об'єкта-гратки періодичну структуру. Для більш об'єктивного аналізу отриманого вторинного зображення було використано відповідне програмне забезпечення.

При аналізі зображень у програмі Pixel Profile було отримано графіки. Представлені матеріали містять профіль зрізу фрагмента спектру (рисунок 4.5, синім) та профіль зрізу фрагмента збільшеного зображення (рисунок 4.5, зеленим) однієї з решіток.

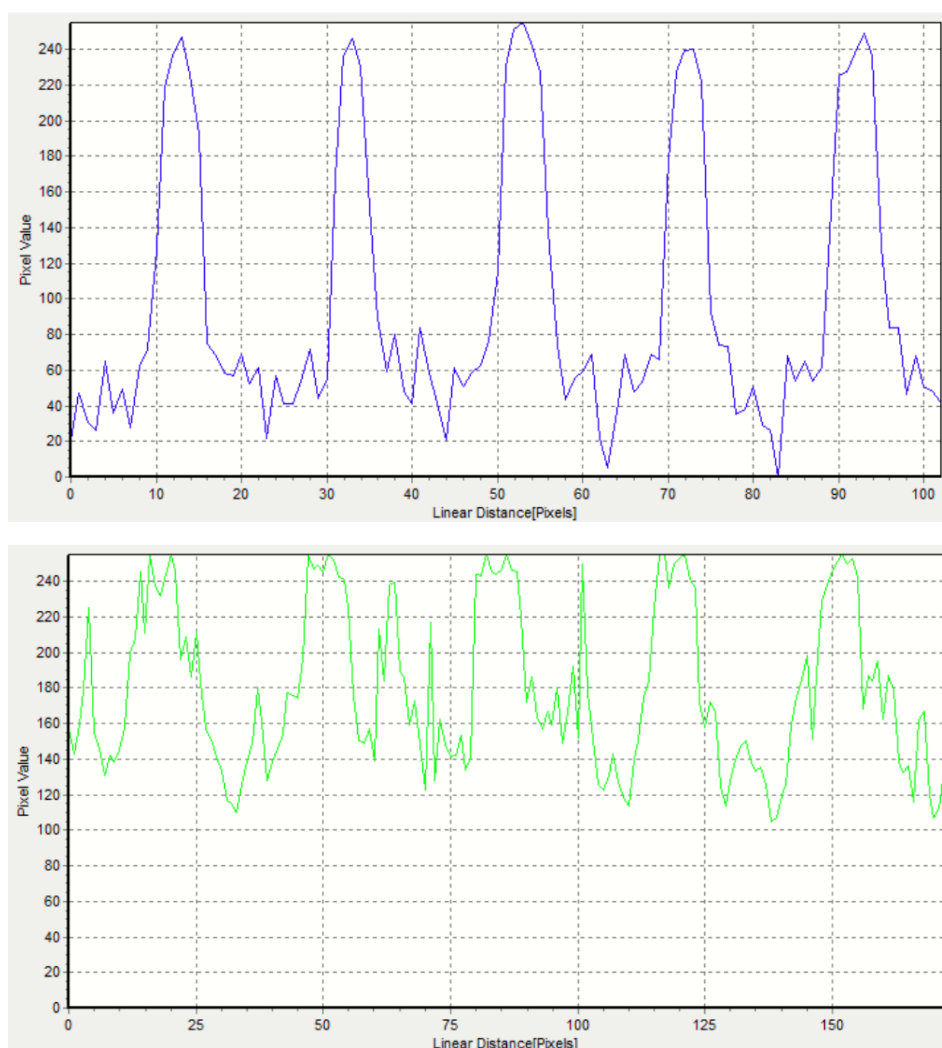


Рис.4.5 – Профіль зрізу спектра та зображення у PixelProfile

На графіку для спектру ясно видно яскраві періодичні ділянки – дифракційні максимуми. На графіку для зображення попри його зашумленість чітко можна відслідкувати періодичність дифракційної ґратки та профіль її фрагмента.

Граничним випадком такого експерименту є таке положення повернутої ґратки, при якому у числову апертуру мікрооб'єктива потрапляє лише один максимум (рис.4.6). Тоді у вторинному зображенні періодична структура відсутня, тобто інформація про структуру об'єкту – дифракційної решітки – не передається. Натомість у площині вторинного зображення спостерігається пляма рівномірної освітленості.

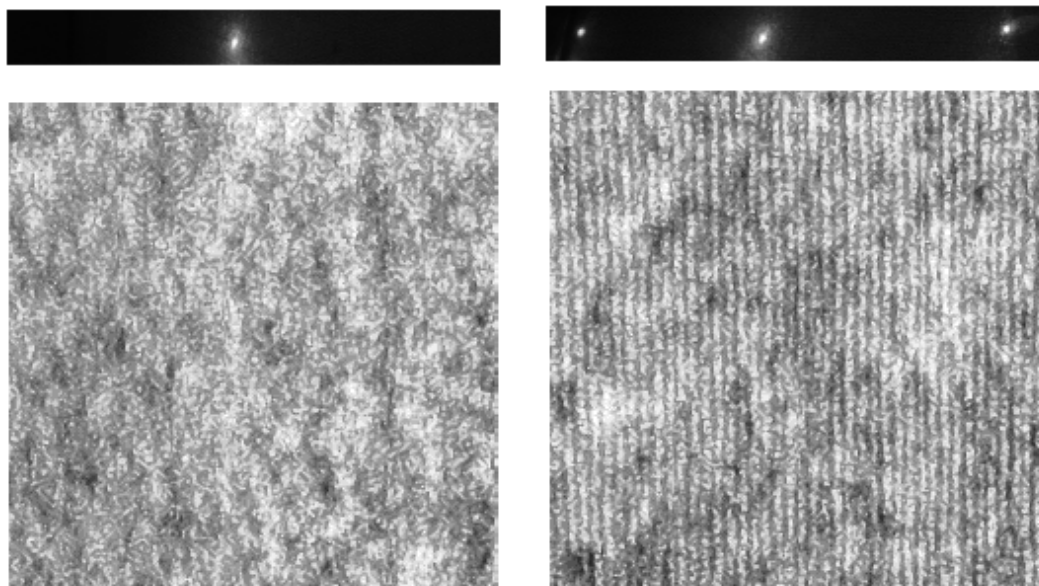


Рис.4.6– Граничний випадок відсутності періодичної структури

Розділ 5. Розробка старт-ап проекту

5.1 Опис ідеї проекту

На основі аналізу історії розвитку теорії формування зображення в мікроскопі було розроблено покращену установку для демонстрації досліду Аббе-Портера (рис.5.1) та створено макет приладу. В цьому розділі приведений можливий варіант старт-ап проекту на основі запропонованої розробки.

Головна ідея проекту полягає у можливості вперше за всю історію теорії формування зображення (за Аббе) бачити первинне та вторинне зображення предмету, а також здійснювати поворот предмету.

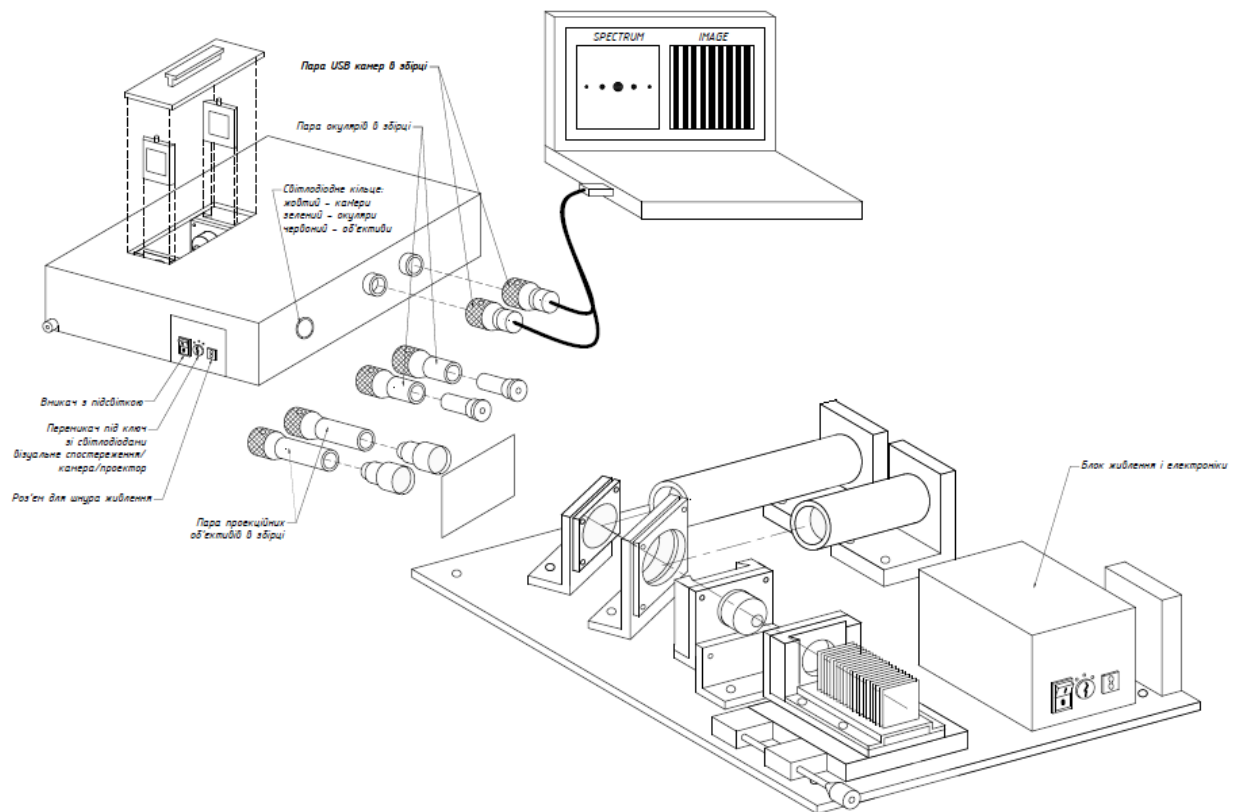


Рис.5.1 – Ідея приладу для демонстрації

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Мікроскоп проєкційний — компактна та економічна установка для демонстрації досліду Аббе-Портера з можливістю вперше за історію спостерігати первинне та вторинне зображення одночасно на спільному екрані та здійснювати поворот предмету	Освіта	Революційне з наукової точки зору рішення, низька ціна, простота і надійність конструкції.
	Реклама	

Таким чином, пропонується суттєво нова конструкція, за допомогою якої можна набагато більш якісно дослідити процес формування зображення в оптичному мікроскопі та проаналізувати його залежність від повороту предмету, що раніше ніколи не було досліджено.

На основі цього можливо провести аналіз потенційних переваг запропонованої ідеї порівняно з рішеннями конкурентів: визначити техніко-економічні переваги, потенційну конкуренцію — товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, провести аналіз сильних та слабких сторін, загрози та можливості, тощо.

Спочатку визначені показники, що мають гірші значення (W, слабкі), аналогічні (N, нейтральні) та кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		64

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Запропоноване рішення	Thor Labs	Edmund	Standa			
1	Економічність приладу	~\$300-\$500	>\$1000	>\$1000	>\$1000			+
2	Компактність	350х250х150мм	>500мм	>500мм	>500мм			+
3	Простота і надійність	Просто і надійно	Просто і надійно	Просто і надійно	Просто і надійно		+	

Проект має декілька сильних сторін. По перше, набагато нижча ціна, оскільки якщо збирати подібну установку з елементів, представлених в каталозі зазначених конкурентів, сума буде щонайменше вдвічі більшою. По друге, компактність, адже типова оптична лава для розміщення набору елементів є доволі габаритною. Нейтральною стороною ідеї є простота та надійність конструкції, тому що елементи конкурентних компаній дуже якісні, надійні та прості у використанні.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту. Розглядаємо можливі варіанти реалізації запропонованої ідеї.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність техно-логій
1.	Створити компактну та економічну установку для демонстрації досліду Аббе-Портера з революційною можливістю спостерігати первинне та вторинне зображення одночасно на спільному екрані та здійснювати поворот предмету	Камера всередині оптичної системи	Наявні	Доступні
		Камера за окуляром	Наявні	Доступні
		Проекційний екран	Наявні	Доступні
Обрана суміжна технологія реалізації ідеї проекту: проекційний екран та приєднувальна камера за окуляром				

На основі аналізу технологічної здійсненності проекту було прийнято рішення поєднання двох варіантів: встановлення проекційного екрану та камери після окуляру з можливістю від'єднування, оскільки обидві технології легко доступні, а така конструкція значно покращує можливості приладу. Камера всередині оптичної системи була би поганим та технологічно незручним рішенням, звужуючим можливості приладу лише до цифрового спостереження.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

Таблиця 5.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	До 10
2	Загальний обсяг продаж, \$/ум.од.	500-1000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Специфічна сфера ринку, революційність продукту
5	Специфічні вимоги до стандартизації та специфікації	Необхідність патентизації
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10%

Зробивши попередній аналіз ринку, можна сказати, що входження на арену такої нової ідеї дещо ускладнене, що обумовлене стагнацією в цій сфері, а також специфічністю продукту.

Далі визначено потенційні групи клієнтів та їх характеристики для орієнтовного переліку вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Освіта у сфері оптики	Керівництва освітніх установ	Важливі економічна складова, якість, надійність та зручність	<ul style="list-style-type: none"> - До продукції: низька ціна, зручність використання - До компанії-постачальника: тривала гарантія та цілодобова підтримка

Основною цільовою аудиторією є керівництва освітніх установ, де можна використовувати подібне обладнання для навчання студентів та проведення демонстрації досліду ніколи раніше не показаного.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Складність виходу на вітчизняний ринок	Специфічна сфера продажу та ситуація в країні це обумовлюють	Проведення рекламних заходів, розширення спектру продукції

Отже, головною загрозою, що ускладнює вихід на ринок, особливо вітчизняний, є специфічність товару, що потребує заходів: як мінімум проведення реклами та розширення спектру товарів, поповнюючи каталог новим освітнім обладнанням. Специфічна ситуація в країні також значно уповільнила би вихід на ринок, адже така група товарів наразі не в пріоритеті. Але обладнання багатьох освітніх установ вже давно застаріло, і рано чи пізно знадобиться його оновлення. Такий прогноз можна вважати позитивним.

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Розширення спектру продукції	Додання більшої кількості низько цінового лабораторного обладнання із покращеними характеристиками	Розробка проектів зі створення такого обладнання

Для підвищення шансів виходу на ринок необхідно розроблювати та створювати нове сучасне обладнання, яке б знайшло свій попит у освітніх установах, в багатьох з яких наявне обладнання вже застаріле, адже доволі скоро знадобиться його оновлення.

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - олігополія	Галузь в основному є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Введення реклами

2. Міжнародний рівень конкурентної боротьби	Конкуренція на вітчизняному і особливо на закордонному ринку	Отримання міжнародних патентів та налагодження зв'язків
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Товарна група в рамках однієї галузі	Локалізація заходів на конкретну галузь
4. Товарно-родова конкуренція	Конкуренція між різними видами товарів однієї галузі (окремі оптичні компоненти)	Врахування особливостей такого виду конкурентної боротьби
5. Суміжна за характером конкурентних переваг	Продукція має як цінову, так і нецінові переваги (революційна конструкція та ін.)	Це значно підвищує шанси на ринку
6. За інтенсивністю – не марочна	Проблем із порушенням авторського права немає	Незалежність

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показує, що наявна конкуренція в Україні і світі дещо ускладнює вихід на ринок, тому необхідно проведення реклами. Ставку необхідно зробити на революційності відкриття та необхідності його вивчення в освітніх установах.

Більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі зазначений в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Фірми, які збирають демонстраційні установки	Виробники окремих компонентів системи	Інтернет-магазини	В багатьох установах застаріле обладнання	Фірми, які збирають демонстраційні установки
Висновки:	Зібрати схожу установку нескладно, але унікальність – в розробленій конструкції	Вхід на ринок можливий при належній рекламі та налагодженні зв'язків	Ціна доставки та інші особливості продажу впливають на оборот	Клієнти задають попит відносно своїх потреб та умов загалом	Необхідно посилити рекламну кампанію в інтернеті

Після аналізу конкурентного ринку ясно, що конкуренцію створюють компанії, що пропонують готове обладнання для освітніх задач, а також компанії, які продають окремі компоненти, що дозволяє зібрати майже будь-яку більш-менш просту установку при наявності уміння. Але пропонована ідея є революційною та унікальною, тож патенти на винахід вирішують питання конкуренції конкретно цього товару.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Революційна конструкція	Дозволяє набагато зручніше застосування з додатковими можливостями вперше за всю історію експерименту
2	Низька ціна	Дозволяє придбати установку навчальним закладам навіть за складних фінансових умов
3	Компактність	Не займає багато місця
4	Простота використання	Продукт простий в експлуатації для будь-яких користувачів
5	Технічне обслуговування	Обслуговування та допомога клієнтам та зацікавленим

Таким чином, існує кілька основних факторів конкурентоспроможності. Ключовим є принципова новизна відкриття, що несе в собі велику наукову цінність. Проста і ергономічна будова в купі з низькою ціною значно підвищують шанси. В придаток планується наявність технічного обслуговування.

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з запропонованим						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Револьюційна конструкція	20	+						
2	Низька ціна	18		+					
3	Компактність	14			+				
4	Простота експлуатації	10			+				
5	Технічне обслуговування	8				+			

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін показав, що не зважаючи на суб'єктивність вагових коефіцієнтів в порівнянні з продукцією конкурентів товар на основі запропонованої ідеї виграє по багатьом позиціям, оскільки прямих аналогів в нього немає. Однак, його специфічність грає проти успішного виходу на ринок.

Таблиця 5.12 SWOT-аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> революційна конструкція, що дозволяє набагато більш повно дослідити процес формування зображення в мікроскопі, низька ціна на основі відносної простоти конструкції та її елементів, ергономічність за рахунок оптичної оптимізації усіх відстаней та надійність	<u>Слабкі сторони:</u> : специфічна та вузько направлена сфера продажу, невелика цільова група клієнтів та відносно малий попит всередині сегменту
<u>Можливості:</u> розширення спектру товарів та подальша оптимізація існуючих конструкцій, вихід на зарубіжний ринок (ідею схвалено зарубіжною науковою спільнотою)	<u>Загрози:</u> низький дохід цільової групи, складна ситуація на вітчизняному ринку, слабка рекламна компанія, необхідність патентування для виходу на закордонний ринок

SWOT-аналіз проекту дає зрозуміти сильні сторони проекту – наукову новизну, просту, компактну і економічну будову; слабкі – занадто специфічну та вузьку сферу застосування, а також невеликий попит всередині малої цільової групи. На основі цього можна виокремити деякі перспективи –

можливість розширення каталогу продукції, оптимізації існуючої конструкції та вихід на ринок зарубіжжя, оскільки даний проект отримав утішні відгуки від багатьох закордонних вчених при представленні на конференціях. Можливо також передбачити загрозу у вигляді недостатніх рекламних заходів та проаналізувати деякі інші – невелику кількість коштів у цільовій групі (адже бюджет кафедр освітніх установ залежить від вливання державних коштів), складну ситуацію в Україні, яка має свій вплив на ринок, а також обов’язкова необхідність патентування в США, Європі, Азії тощо для виходу на відповідний зарубіжний ринок.

Таблиця 5.13 Альтернативи ринкового впровадження старт-ап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Приймати участь в міжнародних конференціях суміжних галузей	50%	6-12 міс.
2	Провести рекламну кампанію	75%	6-12 міс.

На основі SWOT-аналізу легше оцінити альтернативи ринкової поведінки для входження запропонованого проекту та передбачити імовірність отримання ресурсів та попередні терміни реалізації плану.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.2. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Керівництво навчальних установ	Не готові	10 копій	Середня	Середня

Які цільові групи обрано:

В результаті аналізу вирішено працювати напряму з керівництвами навчальних установ

Нажаль, єдиною основною цільовою групою потенційних клієнтів є керівництва освітніх установ, які на основі попередньої оцінки не готові поки прийняти такий специфічний продукт, і попит є вельми невеликим. Однак, конкуренція в сегменті неінтенсивна, і увійти на ринок буде доволі просто при дотриманні правильної стратегії.

Таблиця 5.3. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Розширення товарної групи	Набагато нижча вартість товару в порівнянні з конкурентами	Низька вартість та оптимізація конструкцій приладів	Стратегія фокусування та лідирування у зниженні цін

Було прийнято дотримуватись суміжної стратегії розвитку. Оскільки сфера застосування продукту дуже специфічна, за базову прийнята стратегія фокусування, але товар також має порівняно набагато нижчу ціну серед потенційних конкурентів. Також важливо розширити товарний каталог, аби мати можливість у повній мірі задовольняти потреби обраної цільової групи.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.4. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки?
1	Оптимізація конструкції досить суттєва і принципово нова, тож можна сказати, так	Забирати у існуючих, але і шукати нових, які досі не могли дозволити собі великих витрат	Параметри мікрооб'єктива	Наступальна

Базовою стратегією конкурентної поведінки було обрано наступ, адже товар безперечно є першопрохідцем на ринку, і компанія буде забирати клієнтів у існуючих конкурентів, а також шукати нових, які досі не могли собі дозволити піти на значні витрати. Єдиним копіюваним елементом будуть стандартизовані досі параметри об'єктів мікроскопу.

Таблиця 5.5. Визначення стратегії наступу

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного старт-ап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Наукова новизна, низька вартість, компактність, зручність використання та надійність	Фокусування	Революція у сфері теорії мікроскопії, низька вартість, оптимізована конструкція, компактність, зручність використання та надійність	Наукова новизна, низька вартість, революційна конструкція

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку.

5.5 Розроблення маркетингової програми старт-ап проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.6. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Дешева установка для навчання та розвиток науки	Низька ціна, оптимізована конструкція, компактність	Набагато краща, новітня конструкція; значно нижча ціна, наукова новизна

Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, показало, що потреби групи споживачів такий продукт задовольнив би при наявності у них мотивації.

Таблиця 5.7. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Має революційну конструкцію та набагато нижчу ціну, а також малі розміри та зручність використання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Розмір	360x250x160	
	2. Ціна	500\$	
	Якість: працездатність, надійність та час роботи перевірений дослідними зразками – макетами приладу		
	Пакування: мінімалістичний пакунок з перероблюваного софт-тач картону з лого компанії		
III. Товар із підкріпленням	Марка: назва організації-розробника + Improved setup for Abbe-Porter experiment		
	До продажу: Онлайн-підтримка та представлення будь-якої інформації по продукту		

	Після продажу: гарантія від 12 місяців, цілодобова підтримка по телефону, на сайті компанії, по пошті та у соц. мережах
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенти в Україні, Європі, Азії, США тощо, комерційна таємниця.	

Опис трьох рівнів моделі товару дає можливість доволі повно та наочно отримати уявлення про продукт та оцінити його метаморфозу на різних етапах – у вигляді ідеї, у реальному виконанні та з підкріпленням після продажу.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар. Це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.20).

Таблиця 5.8. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Більше 1000\$	Більше 1000\$	–	250\$ - 450\$

Виконавши аналіз рівня цін на товари замінники, товари аналоги та враховуючи, що дохід цільової групи споживачів не просто точно розрахувати залежить від впливання державних коштів, було орієнтовно сформовано нижню \$250 та верхню \$450 межі встановлення ціни на товар, що дає безперечну цінову перевагу перед товарами конкурентів.

Таблиця 5.9. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна систему збуту
1	Один прилад на одну групу викладачів	Доставка, технічна підтримка	Невелика кількість рівнів посередників	Інтернет-магазин виробника

Збут товару буде відбуватися через сайт розробника. Завдяки цьому можна легко встановлювати контакти зі споживачами та їх подальшу підтримку, організовувати дослідницьку роботу зі збору маркетингової інформації та розробку і реалізацію програм підтримки лояльності клієнтів.

Таблиця 5.10. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного повідомлення
1	Наукове середовище	Телефон, пошта, інтернет, соц. мережі	Низька ціна, оптимізована конструкція, компактність	Донести про важливість освіти та переваги продукту перед конкурентами	Сучасний рівень освіти з малого

Цільова аудиторія клієнтів складається з керівних кадрів навчальних установ. З огляду на це було продумано власну концепцію маркетингових комунікацій і обрано основними каналами телефон, пошту, інтернет, соц. мережі. Для зацікавлення цільової групи необхідно зробити правильні акценти – на науковій новизні розробки, на важливості розвитку та модернізації освіти, на переваги продукту перед конкурентами.

5.6 Висновки розділу старт-ап проекту

З огляду на проведений аналіз моделі старт-ап проекту запропонованої ідеї можна прийти до деякого заключення, приводячи головні отримані на основі такого аналізу дані.

Зважаючи на вузьку спеціалізацію товару, навіть за умов розширення товарної групи та багату рекламну кампанію, вивести запропонований товар на ринок – доволі непроста задача, особливо якщо мова піде про вітчизняний ринок. Адже попри всю його новизну і позитивні якості цільова група потенційних споживачів поки просто не готова на лишні грошові витрати

навіть з огляду на вкрай низьку ціну приладу. Орієнтовна група споживачів – викладачі освітніх установ, бюджет яких напряму залежить від державних впливань коштів, які, зважаючи на поточну ситуацію в країні, відразу розподіляються на більш пріоритетні задачі.

Вихід на зарубіжний ринок також ускладнений, адже виходячи з того, що товар позиціонується як першопроходець ринку, необхідно отримувати патенти (США, Європи, Азії тощо), що значно збільшує величину необхідного стартового капіталу. Іншою затратною стороною є рекламна компанія, без якої шанси виходу на ринок дуже малі.

Таким чином, просування даного стартап-проекту на ринок буде довго тривкою та складною задачею. Підсумувавши можна стверджувати, що існуюча ідея для створення успішного стартап проекту підходить не найкращим чином, однак її цінність для науки незаперечна, в чому, власне, і полягає ідея магістратури з науковим спрямуванням.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		78

Висновок

Під час виконання магістерського дипломного проекту було отримано теоретичне та експериментальне підтвердження узагальненої теорії формування зображень в оптичному мікроскопі, яка дозволяє розрахувати смугу пропускання оптичної системи у тривимірному просторі просторових частот. Вона враховує решітку, нахилену щодо оптичної осі навколо осі, паралельної щілині ґратки. Це робить можливими розрахунки мінімального роздільного періоду оптичних систем як функції кута нахилу решітки.

Теоретичне підтвердження було отримано з використанням скалярної теорії дифракції та відомої формули тонкої лінзи як просторового фазового фільтра. Експериментальне підтвердження було отримано шляхом вимірювання розподілу освітленості у задній фокальній площині та площині зображення мікрооб'єктива при поворотах ґраток у просторі предметів.

У роботі також представлена оптична установка для спостереження просторових спектрів і збільшених зображень у випадку похилих решіток. Було продемонстровано, що при нахилі ґратки смуга пропускання оптичної системи змінюється у повній відповідності до узагальненої теорії формування зображень в оптичному мікроскопі.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження можна розглядати як розширення теорії та експериментів Аббе з двовимірного випадку (площина предмета) на тривимірний випадок (простір предмета).

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		79

Список використаних джерел

- 1) Abbe E., Beitrage zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung, Archiv fur mikroskopische. Anatomie. Entwicklungsmech., 9, 413-468 (1873).
- 2) von Helmholtz H., L. Ueber die Grenzen der Leistungsfahigkeit der Mikroskope, Berliner Monatsberichte 20 Octbr., 625 – 626 (1873).
- 3) Porter A. B., On the Diffraction Theory of Microscopic Vision, Philosophical Magazine, 11 (61), 154-166 (1906).
- 4) Мандельштам Л. И., К теории микроскопического изображения Аббе, Мандельштам Л. И., Полное собрание трудов, под ред. проф. Рытова С. Москва, Издательство Академии наук СССР, 1, 211 – 225 (1948).
- 5) Borovytsky V. Generalization of the theory of image formation in an optical microscope, 118, Kyiv (2017).
- 6) Michel K., Die Grundzuge der Theorie des Mikroskops in elementarer Darstellung, Wissen-schaftliche Verlagsgesellschaft m.b.H., Stuttgart, (1964).
- 7) Lord Rayleigh, On the theory of optical images with special reference to the microscope, Philosophical Magazine, Ser. V, 42, 167 – 195 (1896).
- 8) Рождественский Д. С. Когерентность лучей при образовании изображения в микроскопе, Журнал теоретической физики АН СССР, 10, 305—330 (1940).
- 9) Hopkins H. H., Barham P. M., The influence of the condenser on microscopic resolution, Proceedings of the Physical Society B, 63, 737 (1950).
- 10) Hopkins H. H. Concept of partial coherence in optics, Proceedings of the Physical Society A, 208, 263 – 277 (1951).
- 11) Mareshal A., Franson M., Diffraction Structure des images, Ed. De la Revue d'Optique Theoretic et Instrumental, Paris (1960).
- 12) Sheppard C., Min G., The significance of 3-D transfer functions in confocal scanning microscopy, Journal of Microscopy, 165(3), 377 - 390 (1992).

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

13) Wolf E., Electromagnetic diffraction in optical systems. I. An integral representation of the image field, Proceedings of the Physical Society A, 253, 349 – 357 (1959).

14) Richards B., Wolf E., Electromagnetic diffraction in optical systems, II. Structure of the image field in an aplanatic system, Proceedings of the Physical Society A, 253, 358 – 379 (1959).

15) Михель. Основы теории микроскопа. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.

16) С.К. Стафеев, К.К. Боярский, Г.Л. Башнина. Основы оптики. – Пітер, 2006.

17) В.А. Панов, М.Я. Кругер. Справочник конструктора оптико-механических приборов. – Ленінград: Машиностроение, 1980.

18) А.Н. Матвеев. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985.

19) В.А. Панов, Л.Н. Андреев. Оптика микроскопов. – Ленінград: Машиностроение, 1976.

20) Г.Є. Скворцов, В.А. Панов. Мікроскопи. – Ленінград: Машиностроение, 1969.

21) Академик мандельштам к 100-летию со дня рождения. – М.: Наука, 1979.

22) В.Г. Колобродов, Г.С. Тимчик. Дифракційна теорія оптичних систем. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010.

23) В.П. Коронкевич. Формирование изображения в оптических системах. – Новосибірськ, 2005.

24) Е.В. Шпольський. Сорок лет советской физики. – Успехи физических наук, 1957.

25) Исследование разрешающей способности микроскопа методом Аббе(Лабораторная работа №5.15). – М.: Московський фізико-технічний інститут, 2005.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

26) Hudz O., Borovytsky V., Compact projective microscope. // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science – 2016”.

27) Borovytsky V., Hudz O., Antonenko V., The improved optical setup for Abbe-Porter experiment. // Proceedings of SPIE – 2017. Vol. 10375, 1037513.

28) Hudz O., Borovytsky V., Improved setup for Abbe-Porter experiment. // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science – 2017”.

29) Hudz O., Botovytsky V., Improved optical setup for Abbe-Porter experiment demonstration. // Proceedings of the Conference “A look at the future of instrument making – 2018”

30) Borovytsky V., Hudz O., Abbe experiment with inclined grating // Proceedings of SPIE – 2018. Vol. 10745, 1074512.

31) Гудзь А.Е., Боровицкий В.Н Наглядная демонстрация опыта Аббе-Портера // Тезисы конференции «Новые направления развития приборостроения – 2018» Минск, БНТУ.

32) Гудзь О.Є., Боровицький В.М., Покращена оптична установка для демонстрації досліду Аббе-Портера // Збірник конференції «Погляд у майбутнє приладобудування – 2019»

33) Hudz O.E., Botovytsky V.M., Improved setup for Abbe-Porter experiment // Proceedings of the Conference “Photonics – 2018”.

34) Borovytsky V.M., Hudz O., Simulation of light focusing in optics education // Proceedings of the Conference “Optics and High technology material science - 2018”.

					ПО71мн.0000.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		82